



Runkokäyrä- ja tilavuusmallien laadinta Helsingin katulehmuksille

Jussi Kettula
Pro gradu -tutkielma
Helsingin yliopisto
Metsätieteiden maisteriohjelma
Metsien ekologia ja käyttö
Maaliskuu 2019

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden laitos
Tekijä/Författare – Author Jussi Kettula		
Työn nimi / Arbetets titel – Title Runkokäyrä- ja tilavuusmallien laadinta Helsingin katulehmuksille		
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsävarojen hallinta		
Työn laji/Arbetets art – Level Pro gradu	Aika/Datum – Month and year Maaliskuu 2019	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 116
Tiivistelmä/Referat – Abstract		
<p>Suomessa mallintaminen on ollut keskeinen osa metsänarvointia, koska kaikkea ei ole ollut kustannustehokasta mitata. Malleilla on kuvattu tunnuksia, jotka kiinnostavat esimerkiksi metsän rahallisen arvottamisen, käyttöarvon, kasvun tai tuotoksen näkökulmasta. Runkokäyrä- ja tilavuusmallit ovat historiallisessa mielessä olleet metsätaloudellisesti hyvin tärkeitä, koska puun arvottaminen edellyttää puun mittaamista kuutioissa ja toisaalta käyttöarvon näkökulmasta puun jakamista tukki- ja kuituositteeseen. Laasasenahon (1982) laatimia runkokäyrä- ja tilavuusmalleja voidaan pitää näistä malleista hyvästä syystä merkittävimpinä. Vaikka kyseisten mallien laadintahetkestä on kulunut jo lähes 40 vuotta, ovat ne edelleen käytössä metsäalalla niin tutkimuksessa, käytännön metsäsuunnittelussa, Valtakunnan metsien inventoinneissa, metsäsuunnitteluohjelmistoissa ja hakkuukoneen apteerausalgoritmeissa. Mallien pohjalla on tuhansien koepuiden runkoanalyysiaineisto, jota on käytetty mallien soveltamiseen kolmelle metsätaloudellisesti tärkeimmälle puulajille: männylle, kuuselle ja koivulle. Runkoanalyysissä puut kaadetaan ja rungot mitataan pituuden ja runkokäyrän osalta.</p> <p>2010-luvulla on tehty suuria edistysaskelia laserkeilaustutkimuksessa ja tuoreimpien tutkimusten perusteella on havaittu maastolaserkeilausten tarjoavan varteenotettavan vaihtoehdon runkoanalyysin tekemiseen koepuista. Maastolaserkeilausten etuna on, että mitattavia puita ei tarvitse mittausten suorittamiseksi kaataa. Tämän vuoksi maastolaserkeilausella voidaan mitata sellaisia puita, joita ei ole ollut mahdollista aikaisemmin mitata, koska puiden kaataminen ei ole ollut mahdollista. Tuoreimpien maastolaserkeilaustutkimusten perusteella runkokäyrän mittaaminen ja sitä kautta runkotilavuuden laskeminen voidaan tehdä suurella tarkkuudella laserkeilauksessa syntyvästä kolmiulotteisesta pistepilvestä.</p> <p>Katupuiden saanti tutkimuskäyttöön on ollut lähes mahdotonta, mikäli se edellyttää puiden kaatamista. Lukumääräisesti Helsingin kaupungin alueella kasvaa noin 30 000 kpl katupuita, joista lähes 50 % on puistolehmuksia (<i>Tilia x europaea</i>), metsälehmuksia (<i>Tilia cordata</i>) ja isolehtilehmuksia (<i>Tilia platyphyllos</i>). Vastikään Helsingin kaupunki julkaisi toimenpidesuunnitelman, jossa pyritään saamaan Helsinki hiilineutraaliksi vuoteen 2030 mennessä. Tässä ohjelmassa puut ja kasvillisuus olivat listattu yhdeksi päästökompensaation lähteeksi hiilineutraalisuuskannassa. Puun runko sisältää tyypillisesti ison osan puun maanpäällisestä biomassasta, mutta lehmuksille sen arviointiin ei vielä ole ollut olemassa malleja.</p> <p>Tässä tutkimuksessa tutkittiin maastolaserkeilausella kerättävän pistepilven hyödyntämistä Laasasenahon (1982) kehittämien runkokäyrä- ja tilavuusmallien uudelleen soveltamisessa Helsingin katulehmuksille. Aineistoon kerättiin 75 kpl katupuita, joista 36 kpl keilattiin lehdeliseen aikaan kesällä ja 39 kpl lehdeettömään aikaan talvella. Jokaisesta koepuusta tehtiin 2 kpl keilauksia vastakkaisilta puolilta puuta ja keskimäärin 50 % etäisyydeltä suhteessa puun pituuteen. Rungot erotettiin pistepilvestä ja niille estimoitiin läpimittoja automaattista runkokäyräalgoritmia käyttäen. Lopulliset runkokäyrät saatiin splini-interpoloinnin avulla. Pistepilvestä mitattuja tunnuksia vertailtiin maastomittausten yhteydessä mitattuihin tunnuksiin. Rinnankorkeusläpimitat onnistuttiin pistepilvestä mittaamaan 2,4 cm (9 %) tarkkuudella (RMSE) harhan ollessa -1,1 cm (-4 %). Koepuiden pituudet onnistuttiin mittaamaan 0,9 (8 %) metrin tarkkuudella (RMSE) harhan ollessa -0,2 metriä (-2 %). Mitattujen läpimittojen lukumäärät olivat lehdeettömään aikaan keskimäärin 89 % ja lehdeliseen aikaan 60 % läpimittojen laskennallisesta enimmäismäärästä.</p> <p>Runkokäyrä- ja tilavuusmallit linearisoitiin ja muunnettiin muotoon, jossa mallien sovitusta voitiin tehdä pienimmän neliösumman menetelmällä. Mallit sovitettiin erikseen osa-aineistoihin ja koko aineistoon. Tällä haluttiin tutkia ajankohdan, ja toisaalta aineiston koon vaikutusta mallien soveltamisen onnistumiseen. Lehmukselle sovitettujen runkokäyrämallien tarkkuudeksi (RMSE) saatiin ristiinvalidoinnilla 71,7 dm³ (17,0 %) ja harhaksi -8,2 dm³ (-1,9 %). Tilavuusmallit validoitiin myös ristiinvalidointia käyttämällä. Rinnan- korkeusläpimitaan perustuvan tilavuusmallin tarkkuudeksi saatiin 102,6 dm³ (23,2 %) (RMSE) harhaksi 2,6 dm³ (0,6 %). Rinnan- korkeusläpimitaan ja pituuteen perustuvan mallin tarkkuus oli 70,1 dm³ (16,7 %) harha -0,4 dm³ (-0,1%). Rinnankorkeusläpimitaan, pituuteen ja yläläpimitaan perustuvan malli oli tarkkuudeltaan 31,5 dm³ (7,5 %) harha -0,1 dm³ (0,0 %). Tilavuusmallien keskivirheet olivat: 23,4 %, 16,8 %, 7,5 %. Tutkimuksen tulosten perusteella ei havaittu keilausajankohdalla tai aineiston koolla olevan merkittävää vaikutusta mallien hyvytyteen. Rungolta mitattujen läpimittojen osalta keilausajankohdalla havaittiin olevan olennainen vaikutus läpimitaestimaattien määrään, joka oli selvästi suurempi lehdeettömään aikaan.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords maastolaserkeilaus, tilavuusmalli, runkokäyrämalli		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information		

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	5
1 JOHDANTO	6
1.1 Tutkimuksen tausta	6
1.2 Kaupunkipuiden merkitys	8
1.3 Mallintamisen lähtökohdat	12
1.3.1 Runkokäyrämallit	14
1.3.2 Tilavuusmallit.....	17
1.4 Maastolaserkeilaus	21
1.5 Tutkimuksen tavoite	26
2 AINEISTO JA MENETELMÄT	29
2.1 Helsingin kaupungin katupuurekisteri.....	29
2.2 Koepuiden valinta	31
2.2.1 Koepuiden otanta ja lopullinen koepuuaineisto	32
2.3 Maastomittaukset	35
2.3.1 Tutkimuksessa käytetty laserkeilain.....	35
2.3.2 Koepuiden paikantaminen ja merkintä.....	36
2.3.3 Koepuista mitatut tunnuksset.....	37
2.3.4 Aineiston rakenne.....	39
2.4 Pistepilvien käsittely ja runkojen erottaminen	41
2.4.1 Kriteerit rungon ja runkojen erottamiseen pistepilvestä.....	42
2.4.2 Runkojen erottaminen	44
2.5 Läpimittojen mittaaminen pistepilvestä runkokäyräalgoritmilla.....	47
2.6 Lopulliset runkokäyrät ja puukohtaisten tunnusten mittaaminen.....	51
2.6.1 Runkokäyrien suodatus ja interpolointi.....	51
2.6.2 Puukohtaisten tunnusten mittaaminen.....	54
2.7 Runkokäyrä- ja tilavuusmallien sovittaminen	55
2.7.1 Kontrollitilavuuksien laskenta interpoloiduista runkokäyristä.....	55
2.7.2 Runkokäyrämalli ja sen sovittaminen lehmuksille	56
2.7.3 Tilavuusmallien uudelleen sovittaminen lehmuksille	60
2.7.4 Mallien sovittamisessa käytetyt mallinnusaineistot ja mallien hyvyyden arviointi ...	64
2.7.5 Lehmukselle sovitettujen mallien vertailu koivun runkokäyrä- ja tilavuusmalleihin	67
3 TULOKSET	70
3.1 Läpimittojen ja pituuksien mittaustarkkuus pistepilvestä	70
3.2 Runkokäyrämallin sovittamisen tulokset	73
3.3 Tilavuusmallien sovittamisen tulokset	78
3.4 Lehmukselle sovitettujen mallien vertailu koivun malleihin	84

4 TULOSTEN TARKASTELU	92
4.1 Koepuuaineiston ja referenssirunkokäyrien luotettavuuteen vaikuttavat tekijät	92
4.2 Pistepilvestä mitatut läpimitat ja pituudet	94
4.3 Runkokäyrämallin onnistuminen	98
4.4 Tilavuusmallien onnistuminen	100
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	104
6 LÄHTEET	106

ALKUSANAT

Tässä tutkimuksessa käytetyn aineiston kerääminen toteutettiin osana Helsingin kaupungin innovaatorahaston rahoittamaa *3D-virtuaalipuistot* -hanketta. Aineiston keräämisessä käytetty maastolaserkeilain saatiin tutkimusta varten lainaksi Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskuksesta (FGI). Laserkeilausaineiston prosessoinnissa hyödynnettiin Helsingin yliopiston metsätieteellisen tiedekunnan hallussa olevia ohjelmistoja, yliopiston tiloja ja tietokoneita. Haluan kiittää Helsingin kaupunkia, Maanmittauslaitoksen paikkatietokeskusta ja Helsingin yliopistoa tutkimuksessani käytetyn aineiston hankinnan mahdollistamisessa. Haluan myös kiittää ohjaajaani Ninni Saarista (HY), jonka arvokkaat neuvot ja tuki edesauttoivat tämän tutkimuksen loppuun saattamisessa.

Seinäjoella maaliskuussa 2019

Jussi Kettula

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Metsäalalla mallintaminen ja mallipohjaiset sovellukset ovat aina olleet yleisiä ja niitä on käytetty ja kehitetty jo hyvin varhaisessa vaiheessa ennustamaan kiinnostuksen kohteena olevia tunnuksia puusta ja puustosta (kts. Höjer 1903). Mallien käyttö on ollut suosittua, koska kaikkia tunnuksia ei ole voitu helposti tai kustannustehokkaasti mitata. Mallintamisen keskeisenä tausta-ajatuksena on riippuvuuden käsite, eli edellytys selitettävän muuttujan riippuvuussuhteesta helpommin mitattavissa olevaan selitettävään muuttujaan. Puu- ja puusto ovat tässä mielessä hyvä mallintamisen kohde, sillä puiden ulkomuoto, mittasuhteet ja kasvu kehittyvät tiettyjen perinnöllisten ja ympäristöllisten säännönmukaisuuksien vaikutuksesta.

Suomessa on perinteisesti ollut metsätaloudellisessa mielessä kolme tärkeää puulajia; mänty, kuusi ja koivu. Näille puulajeille on kehitetty useita eri malleja ennustamaan niin ekologisia ominaisuuksia, laatua, kasvua ja paljon muuta. Yksittäisen puun mittakaavassa eräitä haastavimpia ja työläimpiä mitattavia tunnuksia ovat puun runkokäyrä ja runkotilavuus. Samaan aikaan molemmat ovat kuitenkin metsätaloudellisessa mielessä myös hyvin keskeisiä, sillä niitä käytetään puun ja puuston rahallisen arvon, sekä käyttöarvon määrittämisessä. Puun arvo ilmaistaan tyypillisesti euromääräisenä arvona runkotilavuuden kuutiota kohden, joten mitattu tai ennustettu tieto runkotilavuudesta mahdollistaa arvonmäärittäksen puukohtaisesti. Runkotilavuus ei kuitenkaan yksiselitteisesti kuvaa paljonko puuta voidaan jalostaa korkeampi-arvoiseksi sahatavaraksi ja mikä osuus siitä on vähempiarvoista kuitupuuta. Jalostusarvoa kuvaa paremmin runkokäyrä, jolla tarkoitetaan puun rungon kapenemista pituuden suhteen. Runkokäyrän tunteminen mahdollistaa puun katkonnan, eli apterauksen optimaalisella tavalla maksimoiden lopputuloksena syntyvien ositteiden arvoa. Sekä runkotilavuuden, että runkokäyrän mittaaminen on aikaisemmin vaatinut poikkeuksetta puun kaatamista. Olemassa olevat riippuvuudet muiden helposti mitattavissa olevien tunnusten kanssa, kuten puun rinnankorkeusläpimitta ja pituus, mahdollistavat runkotilavuuden ja runkokäyrän mallintamisen.

Mallien kehittämisen edellytyksenä on riittävän aineiston hankinta mallien sovittamista ja validoimista varten. Tästä syystä myös runkokäyrä- ja tilavuusmallien taustalta löytyy

historiallisesti hyvin laajat koepuuaineistot, joista mittaukset ovat tehty puiden kaatamisen jälkeen. Kaupunkipuut, eli katu- ja puistopuut ovat marginaalinen puujoukko, joiden kaataminen tutkimuskäyttöön on lähes mahdotonta. Kaupunkipuissa korostuvat yksittäisen puun tasolla rahallinen, kulttuurillinen, esteettinen ja olemassaolon arvo. Puiden kaataminen voi synnyttää äänekästä vastustusta, vaikka se nähtäisiin välttämättömänä puiden elinkelpoisuuden laskun, tai infrastruktuurin ylläpidon vuoksi (Jokinen 2017).

Kiinnostus kaupunkipuiden runkotilavuuden mittaamista kohtaan on viime aikoina kasvattanut lisääntyvä keskustelu hiilitaseesta ja hiilineutraalisuudesta. Hiilineutraalisuuden tavoittelussa esimerkiksi Helsingin kaupunki (2018) on maininnut elokuussa julkaisemassaan toimenpideohjelmassa pyrkimyksen saavuttaa hiilineutraalisuus vuoteen 2035 mennessä. Tämän päämäärän tavoittelussa myös Helsingin alueella olevat puut ja kasvillisuus on listattu yhdeksi tärkeäksi hiilinieluksi. Puihin ja kasvillisuuteen sitoutunutta hiiltä ehdotetaan tulevaisuudessa käytettävän yhtenä päästökompensaation lähteenä päästölaskennassa, jos hiilivarannon mittaaminen pystyttäisiin tekemään riittävällä tarkkuudella. Aikaisemmissa tutkimuksissa hiilivarannon määrittäminen on osoittautunut haasteelliseksi (Rasinmäki ja Känkänen 2014). Kasvava puu sitoo jokaista kerryttämäänsä puukuutiometriä kohden noin 0,9 tonnia hiilidioksidia ilmakehästä (Luonnonvarakeskus 2009). Elinaikanaan puu vois siis potentiaalisesti sitoa ilmakehästä jopa 500-1000 kg hiilidioksidia.

Katupuihin sitoutunutta hiiltä tulisi ensisijaisesti arvioida biomassamalleilla, sillä ne huomioivat puun maanpäällisen biomassan, eli rungon, oksat ja lehdet. Runkotilavuuden voidaan kuitenkin myös nähdä olevan suuntaa antava, sillä esimerkiksi Lehtosen ym. (2004) mukaan 75-85 % puun biomassasta on sijoittunut boreaalisella vyöhykkeellä puun runkoon. Runkoon kertyneen biomassan määrän ja sen jakautumisen rungon eri osiin on kuitenkin todettu katuolosuhteissa kasvaneissa puissa olevan erilainen kuin metsässä kasvaneissa puissa (McHale ym. 2009). Suomessa esimerkiksi katuolosuhteissa kasvaneiden rauduskoivujen suhteen on havaittu, että biomassasta yli 50 % on sitoutuneena runkopuuhun keskimäärin (Tanhuanpää ym. 2017a).

Hiilivarannon arviointia ei voida tehdä suoraan, vaan se täytyy arvioida mallintamisen avulla. Helsingin alueella sijaitsevilla metsillä puulajisuhteet ovat pääasiassa samat, kuin Suomessa yleisestikin. Luonnonvarakeskuksen (2012) mukaan Suomen yleisimmät puulajit ovat mänty (67 %), kuusi (22 %) ja raudus- sekä hieskoivu (11 %). Helsingin katu-

ja puistopuulajisto ei kuitenkaan vastaa metsien puulajistoa. Helsingin kaupungin rakennusviraston (2014a) mukaan Helsingin katupuustossa eniten on puistolehmuksia (45 %), metsävaahteraa (12 %) ja rauduskoivua (11 %). Olemassa olevia runkokäyrä- ja tilavuusmalleja ei ole tiettävästi milloinkaan sovitettu puistolehmukseen tai metsävaahteralle, koska niiden määrät ovat varsinaisessa metsälajistossa vähäiset ja niiden rooli metsätaloudellisesti marginaalinen. Esteenä on myös ollut koepuuaineiston saatavuus, sillä kyseisiä puulajeja ei ole ollut mahdollisuutta saada tutkimuskäyttöön suuria määriä.

Katupuustossa puulajeista lehmus on selvästi yleisin ja kattaa lähes puolet katupuuston puista. Sovittamalla runkokäyrä- ja tilavuusmallit lehmukseen voidaan malleilla kattaa lähes 50 % koko katupuupopulaatiosta. Malleja käyttämällä voitaisiin arvioida sitoutuneen hiilen määrää puukohtaisesti ja yleistettynä koko katupuupopulaatioon. Mallit mahdollistaisivat myös täysin erilaisen kasvuympäristön vaikutuksen tutkimisen puun runkomuotoon ja pituuteen.

1.2 Kaupunkipuiden merkitys

Istutettuja kaupunkipuita, eli puistopuita ja katupuita on Helsingin kaupungin rakennusviraston (2014a) mukaan Helsingissä noin 230 000 kpl, joka on enemmän kuin missään muualla Suomen kaupungeissa. Esimerkiksi Turun kaupunki mainitsee katu- ja puistopuiden määrän olevan kokonaisuudessaan noin 33 500 kappaletta (Turun kaupunki 2016). Helsingissä katupuiden osuus kaupunkipuista on lukumääräisesti noin 30 000 kpl (Helsingin kaupungin rakennusvirasto 2014a). Tanhuanpään (2017b) tekemän kartoituksen perusteella Helsingin kaupungin rakennusviraston puistoiksi luokittelemilta alueilta on kartoitettu lähes 400 000 puuta ja epävarmuudet huomioituna puiden lukumäärä on luultavasti lähempänä 440 000 kappaletta. Istutettujen kaupunkipuiden osuus on siis noin 60 % Helsingin kaupungin alueella sijaitsevista puisto- ja katupuista.

Katupuita voidaan käyttää infrastruktuurin suunnittelussa rajaamaan, suojaamaan ja yhdistämään erilaisia alueita (Helsingin kaupungin rakennusvirasto 2014a). Puiden latvukset tarjoavat katujen varsilla oleville asuinrakennuksille näkösuojaa ja asukkaille yksityisyyttä. Katupuut tuovat kaupungin rakennettuun ympäristöön vihreyttä ja luontoa. Puut ovat pitkäikäisiä ja kasvavat ajan saatossa kiinteäksi osaksi kaupunkikuvaa. Kaupunkilaisten kiintymyksen katupuita kohtaan osoittaa parhaiten niiden kaatamisesta helposti

aiheutuvat konfliktit, jonka esimerkiksi Helsingin Sanomissa Mechelininkadun lehmukista kirjoitettu uutisartikkeli osoitti (Jokinen 2017).

Istutetut kaupunkipuut ovat rahalliselta arvoltaan usein hyvin kalliita. On arvioitu, että keskimäärin yhden katupuun istutuskustannukset ovat noin 2500 € (Helsingin kaupungin rakennusviraston 2014b). Hinnasta noin 10 % aiheutuu istutettavasta taimesta ja loppuosuus muodostuu rungonsuojasta, kasvualustasta ja istutustyöstä. Elinaikanaan katupuille joudutaan tekemään paljon erilaisia hoitotoimenpiteitä, kuten kastelua ja latvuston rakennelikkauksia, jotka kerryttävät perustamiskustannuksen lisäksi huomattavan määrän lisäkustannuksia. Puiden kasvualustaa usein lannoitetaan ja joissain tapauksissa se joudutaan jopa vaihtamaan. Helsingin kaupungin rakennusviraston (2014b) mukaan täysikasvuisen katupuun rahallinen arvo voi olla moninkertainen puun uudelleenistutusrvoon verrattuna. Rakennusvirasto on arvioinut hallinnoimansa puuomaisuuden arvoksi noin 275 miljoonaa euroa, josta 75 miljoonaa on peräisin katupuista. Luvut on laskettu käyttäen puiden uudelleenistutusrvoa. Jos huomioitaisiin myös puiden hoidosta syntyneet kustannukset, olisivat luvut paljon suuremmat.

Katupuihin liittyy lukuisia erilaisia ekosysteemipalveluita, jotka voidaan jakaa tuotantopalveluihin, säätelypalveluihin, kulttuuripalveluihin ja tukipalveluihin (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Näistä varsinkin säätelypalvelut ja kulttuuripalvelut korostuvat katupuiden tapauksessa (Helsingin kaupungin rakennusvirasto 2014a). Säätelypalveluihin kuuluu esimerkiksi hiilen sidonta, yhteyttämisessä syntyvä happi ja melun torjunta (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Lisäksi niihin voidaan sisällyttää katupuiden tapauksessa myös hulevesien hallinta ja lämmönsäätely (Helsingin kaupungin rakennusvirasto 2014a). Kulttuuripalvelut ovat puiden tarjoamat esteettisiä, henkisiä ja virkistyksellisiä arvoja (Millennium Ecosystem Assessment 2005).

Kaupunkipuilla on tärkeä rooli osana luonnon monimuotoisuutta. Kaupunkipuut muodostavat kaupungin sisään ekologisia käytäviä ja tarjoavat elinympäristön monille eri eläin-, lintu- ja hyönteislajeille (Helsingin kaupungin rakennusvirasto 2014a). Kaupunkiympäristöön jätetään usein tarkoituksella lahopuita, jotka osaltaan tarjoavat elinpaikkoja erilaisille lahottajasienille ja hyönteislajeille. Katupuiden rungoilla kasvaa myös lukuisia erisammal- ja jäkälälajeja. Katupuustossa monimuotoisuutta rajoittavana tekijänä on kasvu- paikan vaatavuus, joka vähentää katupuustossa käytettävien puiden lajivalikoimaa. Kas-

vupaikan stressaavuus syntyy esimerkiksi hapen, veden tai ravinteiden puutteen seurauksesta (Embrén ym. 2009). Katupuiden kasvupaikka on vaativa myös siksi, että se altistaa puita mekaanisille vaurioille, tiesuolalle, maanalaisen juuristotilan vähyydelle ja saasteille (Helsingin kaupungin rakennusvirasto 2014a). Lehmus on yleisin puulaji katupuustossa, koska se sietää parhaiten katualueen stressaavia kasvuolosuhteita.

Ekosysteemipalveluiden hyötyjä on pyritty selvittämään useissa eri tutkimuksissa ja erilaisilla lähestymistavoilla. Katupuiden on esimerkiksi havaittu poistavan ilmakehästä epäpuhtauksia muun muassa: absorboimalla niitä lehdensisäiseen solunesteeseen ja adsorboimalla niitä lehtien ulkopinnoille (Smith 1990). Puiden on myös havaittu poistavan ilmakehästä partikkeleita sedimentoitumisilmiön kautta, jolloin ne tuulennopeutta hidastamalla aiheuttavat partikkeleiden sedimentoitumisen maahan (Matero ym. 2003). Otsoni on tärkeä kaasu yläilmakehässä, mutta alailmakehässä sen on havaittu olevan myrkyllistä eläville olennoille ja toimivan lisäksi tehokkaana kasvihuonekaasuna (Nevanlinna 2008). Puiden luonnostaan vapauttamien VOC-kaasujen, eli haihtuvien orgaanisten yhdisteiden, on todettu reagoivan otsonin kanssa alailmakehässä muuttaen sitä vähemmän haitallisiksi yhdisteiksi ja vähentäen sen pitoisuuksia kaupungissa (Cardelino ja Chameides 1990; Taha 1996; Lindfors ja Laurila 2000; Seppälä 2004). Yhdysvalloissa New Yorkissa on mallintamisella havaittu, että latvuspeiton lisääminen 10 prosentilla urbaanissa ympäristössä vähensi otsonin määrää ilmassa noin 3 % (Luley ym. 2002).

Katupuiden on havaittu vaikuttavan kaupungin ääriämpötiloja tasaavasti (McPherson ym. 1997). Viilennysvaikutus syntyy, kun auringon säteily haihduttaa vettä puiden lehdistä ja veden haihtuminen viilentää lehtiä ja sitä kautta myös ilmaa (Nowak ja Dwyer 2007). Viilennysvaikutuksen on arvioitu olevan suuruudeltaan jopa 2-3 celsiusastetta paahteisissa kaupungeissa, joissa on paljon tummia pintoja (Akbari ym. 1992). Viilennysvaikutuksella on myös toisaalta hiilidioksidipäästöjä alentava vaikutus, sillä ilmastointilaitteiden sähkönkulutus alenee (Akbari 2002). Luonnollisesti puu alentaa hiilidioksidin määrää ilmakehässä kasvamalla, sillä 48-50 % puun kuiva-ainepitoisuudesta on hiiltä (Alakangas ym. 2016).

Lämpötilojen ohella katupuilla on havaittu olevan vaikutusta myös tuulennopeuksiin kaupungin sisällä, riippuen puiden lukumäärästä ja niiden tiheydestä (Heisler ym. 1995). Heisler (1990) havaitsi, että 24 % latvuspeitto alensi 2 metrin korkeudella maasta tuulen-

nopeuksia 40-50 % verrattuna alueeseen, jossa latvuspeittoa ei ollut. Suurempi latvuspeitto (67 %) vaimensi tuulennopeutta lähes 70 % verrattuna tuulennopeuteen puuttomalla alueella. Tanhuanpään (2017b) mukaan Helsingin kaupungin alueella sijaitsevien puistoksi luokiteltujen alueiden latvuspeitto on keskimäärin 49,6 %.

Hulevedet, eli rakennetulta alueelta poisjohdettavat sade- ja sulamisvedet voivat olla ongelmallisia aiheuttaessaan tulvia kaduilla ja viemäriverkostossa (Hulevesiopas 2012). Katupuilla on havaittu olevan hulevesien hallinnassa positiivisia vaikutuksia. Puut esimerkiksi hidastavat sadeveden pääsyä maahan, kun osa sadannasta osuu ensin puun latvukseen. Lisäksi puut tasaavat hulevesien poistovirtausnopeutta ja vähentävät niiden määrää haihduttamalla osan vedestä (Nowak ja Dwyer 2007). Tasaamalla veden virtausta puut voivat myös vähentää tulvien aiheuttamia vaurioita ja alentaa hulevesien käsittelyn kustannuksia (Nowak ja Dwyer 2007). Sandersin (1986) mukaan 22 % latvuspeitto vähensi hulevesien virtaamaa noin 7 %. Embrénin ym. (2009) mukaan täysikokoinen latvusläpimitaltaan 14 metrin lehmus kykenee aurinkoisena päivänä haihduttamaan jopa 670 litraa vettä vuorokaudessa. Hulevedet voivat olla katupuille myös ongelmallisia, sillä ne sisältävät epäpuhtauksia, kuten öljyä ja maantiesuolaa (Embrén ym. 2009; Riikonen ym. 2016).

Yksi kaupunkipuiden ja kasvillisuuden hyödyistä on myös havaittu olevan kyky vaimentaa melua (Aylor 1972). Tiheä puusto vaimentaa melua jopa 12 % 20 metrin etäisyydellä melunlähteestä (Ow ja Ghosh 2017). Lisäksi puiden keskiläpimitan suuruudella huomattiin olevan selkeä yhteys melun vaimenemiseen, sillä suuret puut vaimentavat melua pienää puita enemmän.

Kaupunkipuista saatavia sosiaalisia hyötyjä ja ekosysteemipalveluihin kuuluvia kulttuuripalveluita ovat muun muassa erilaiset virkistys- ja esteettisyysarvot (Helsingin kaupungin rakennusvirasto 2014a). Kaupunkipuut lisäävät viihtyisyyttä, asukkaiden psyykkistä hyvinvointia ja esteettistä asuinalueiden laatuvaikutelmaa (Schroeder 1989 viitattu Nowak ja Dwyer 2007). Sosiaalisia hyötyjä on hyvin paljon, ne voivat olla suoria tai epäsuoria ja usein niitä on myös hankalaa mitata (Nowak ja Dwyer 2007). Hyödynsaajat voivat olla yksityishenkilöitä, yrityksiä tai hyödyt voivat kohdistua yhteisölle kokonaisuudessaan (Westphal 2003). Puut tuovat luontoa lähemmäksi asukkaita, mikä voi tarjota emotionaalisia ja mentaalisia hyötyjä (Schroeder 1991). Katupuusto voi myös lisätä

työntekijöiden kokemaa työn mielekkyyttä, työpaikan viihtyisyyttä ja alentaa työntekijöiden stressitasoja (Kaplan 1993).

Kaupunkipuustolla on havaittu olevan positiivisia vaikutuksia yksilötasolla kognitiiviseen oppimiseen ja käyttäytymiseen. Wellsin (2000) mukaan lapset oppivat paremmin ja käyttäytyvät paremmin, kun asuinalueella on puistoja ja luontoa on nähtävissä ikkunasta. Ulrich (1984) havaitsi, että leikkauspotilaat parantuivat leikkauksesta nopeammin ja tarvitsivat vähemmän kipulääkitystä, jos he pystyivät tarkkailemaan sairaalaolon aikana luontoa ikkunan kautta. Katupuilla ja puistoilla on myös todettu olevan jossain määrin hengityselinsairauksia ehkäisevää vaikutusta, kun ne poistavat terveydelle haitallisia hiukkasia ilmasta (McPherson ym. 1992). Heislerin ym. (1995) mukaan puiden varjostus vähentää haitallista UV-säteilyä ja voi näin ehkäistä ihosyöpää. Luonnollisesti puihin liittyy myös joitain terveyttä haittaavia ominaisuuksia, kuten siitepöly ja siihen liittyvät allergiaoireet.

Kaupunkipuustolla on myös havaittu olevan positiivisia vaikutuksia koko yhteisön näkökulmasta. Kuo (2003) havaitsi, että asuinalueen puustoisuus korreloi naapuruston tiiviimmän yhteisöllisyyden kanssa ja alueilla tehtiin vähemmän omaisuus- ja väkivaltarikoksia. Luonnon läheisyyden on nähty vähentävän asukkaiden tylsistyneisyyttä ja turhautuneisuutta, joka osaltaan vähentää rikoksia (Kuo ja Sullivan 2001a). Puustoisuus lisää alueen miellyttävyyttä ja vähentää asukkaiden kokemaa rikosten pelkoa (Kuo ja Sullivan 2001b). Ihmisten havaittiin luokittelevan alueet sitä turvallisemman tuntuisiksi, mitä enemmän puustoa ja vihreyttä maisemassa oli mukana (Kuo ym. 1998). Puustoisuuden on myös todettu vaikuttavan Suomessa asuinalueiden ja asuntojen hintoja nostavasti (Tyrväinen 1997; Tyrväinen ja Miettinen 2000)

1.3 Mallintamisen lähtökohdat

Metsänarvioimistieteen näkökulmasta tärkeät puun fyysiset tunnuksot, kuten rinnankorkeusläpimitta, pituus, runkokäyrä ja tilavuus, ovat pääasiassa puun perinnöllisten tekijöiden määräämiä ominaisuuksia (Kangas ym. 2011). Puun fyysiseen ulkomuotoon vaikuttavat myös vahvasti ympäristön olosuhteet, kuten valon määrä ja kasvutila. Vaikka puun tunnuksiin vaikuttavat useat eri tekijät, ovat ne siitä huolimatta usein melko säännönmu-

kaisia eri olosuhteissa ja tämän hyödyntäminen antaa pohjan eri tunnusten mallintamiselle. Mallintamisessa käytetään hyödyksi puun tunnusten riippuvuutta toisistaan, eli alometriaa (Kangas ym. 2011).

Puun tunnuksien mallintamisessa voidaan hyödyntää tilastollisia malleja, koska puun tunnusten ja kasvuolosuhteiden välillä on tilastollista yhteisvaihtelua, joka mahdollistaa tunnusten kuvaamisen tilastollisilla menetelmillä (Kangas ym. 2011). Tilastollisen mallin sovittaminen aineistoon ja mallilla ennustaminen ominaisuuksiltaan vastaavanlaisessa aineistossa mahdollistaa saatujen estimaattien harhattomuuden, eli malli ennustaa keskimäärin oikein aineiston suhteen. Tilastollinen malli selittää osan ilmiössä olevasta vaihtelusta, mutta usein osa vaihtelusta jää selittämättä, eli malliin jää selittämätöntä virhettä.

Jos puun mittasuhteet olisivat riippuvaisia ainoastaan perinnöllisistä tekijöistä, niin puut kasvaisivat ympäristöstä riippumatta samalla tavalla. Koska ympäristö kuitenkin vaikuttaa osaltaan puiden ulkomuotoon, niin on tärkeää, että kasvuolosuhteet, joihin tilastollinen malli sovitetaan vastaavat olosuhteita, joihin ennustetaan. (Kangas ym. 2011). Puun tunnusten välillä oleva yhteisvaihtelu on riippuvaista ympäristöstä ja sen vuoksi vaihtelu saattaa muuttua ympäristön muuttuessa, mikä voi aiheuttaa ympäristöön sovittamattoman mallin tapauksessa harhaisuutta.

Mallintamisen kohteen, eli vastemuuttujan määrittävät käytännössä mittausvaikeus, muuttujien välinen yhteisvaihtelu sekä muuttujien arvo suunnittelutilanteen näkökulmasta (Kangas ym. 2011). Malleilla pyritään ennustamaan sellaisia muuttujia, joiden mittaaminen on hankalaa ja kallista, mutta jotka ovat suunnittelun tai muuttujien kiinnostavuuden näkökulmasta tärkeitä. Selittäviksi muuttujiksi taas pyritään valitsemaan tunnuksia, joiden mittaaminen on kustannustehokasta, helppoa ja jotka ovat riippuvuussuhteessa kiinnostavien muuttujien kanssa.

Runkokäyrä- ja tilavuusmallinnuksessa mallien laadinta-aineisto on perinteisesti kerätty runkoanalyysiä käyttäen (Laasasenaho 1982; Korhonen ja Maltamo 1990). Tällöin aineistoon valitut koepuut kaadetaan ja runkojen pituudet mitataan joko tyveltä tai kannon korkeudelta latvaan. Rungoilta mitataan läpimittoja joko kiinteitä pituusvälejä tai suhteellisia mittauskorkeuksia käyttäen. Käytettäessä kiinteää mittaussäilyä, tulee pienistä puista määrittäen vähemmän mittauksia, kuin suurista puista. Tämän vuoksi voi olla perusteltua käyttää suhteellisia mittauskorkeuksia, jolloin puista tulee koosta riippumatta aina sama määrä mittaushavaintoja. Mitattujen läpimittojen ja niitä vastaavien rungon korkeuksien

avulla rungot kuutioidaan runkotilavuudeksi. Usein on perusteltua kuutioimista edeltävästi suorittaa mitattujen läpimittojen välien interpolointi esimerkiksi splini-interpolointia käyttäen (kts. Lahtinen ja Laasasenaho 1979). Rungon voidaan myös olettaa mittauskohtien välillä noudattavan jotain tunnettua pyörähdyskappaleen muotoa, kuten katkaistua kartiota, neiloidia tai lieriötä.

1.3.1 Runkokäyrämallit

Puun runkokäyrä kuvaa puun kapenemista pituuden funktiona. Runkokäyrän avulla puun rungon tunnusten arvioiminen on verraten luotettavaa ja yksinkertaista (Kangas ym. 2011). Runkokäyrää voidaan käyttää hyväksi puun runko-osuuden jakamisessa tukki- ja kuituositteeseen. Runkokäyrän avulla voidaan vaivattomasti selvittää tiettyä läpimittaa korkeammalle tai alemmalle jäävän runko-osuuden tilavuus ositteiden läpimittojen ja pituuksien avulla. Runkokäyrän tunteminen mahdollistaa puun kokonaistilavuuden laskeamisen, puun rungon jakamisen haluttuihin läpimitan dimensioiden ja dimensioiden pituuksien ja tilavuuksien laskemisen (Maltamo ja Laukkanen 2001).

Runkokäyrämallilla voidaan ennustaa rungon läpimitat millä tahansa korkeudella, kun tiedetään rinnankorkeusläpimitta ja puun pituus. Runkokäyrämallien käyttämistä tilavuuden estimoimiseen on tutkittu Suomessa useammassa tutkimuksessa (Kilkki ja Varmola 1981; Laasasenaho 1982; Lappi 1986). Runkokäyrämallien käyttämistä apteeraukseen ovat tutkineet muun muassa Korhonen (1994) ja Puumalainen (1998). Uusitalo (1995) sitä vastoin tutki runkokäyrämallien käyttöä tukkitilavuuksien laskentaan latvaläpimitta- ja pituusluokittain. Ahonen (1996) keskittyi rungon katkonnan optimoimiseen eli apteeraukseen runkokäyrämalleja käyttäen.

Runkokäyrämalleissa on käytetty tutkimuksissa kahdenlaista lähestymistapaa: Jatkuvia yhtälöitä ja läpimittayhtälöitä (Maltamo ja Laukkanen 2001). Jatkuissa yhtälöissä runkokäyrä esitetään yhdellä epälineaarisella yhtälöllä, joka on riittävän notkea kuvaamaan koko runkokäyrä. Vaihtoehtoisesti runkokäyrä voidaan mallintaa myös paloittain useammalla eri yhtälöllä, jotka yhdistetään yhtenäiseksi runkoa kokonaisuudessaan malliksi. Yhtälöt ennustavat suoraan joko läpimittaa tai jotain läpimitan muunnosta, kuten muotosuhdetta.

Paloittain runkoa kuvaavia malleja on kehittänyt muun muassa Roiko-Jokela (1974), Max ja Burkhart (1976) ja Perez ym. (1990). Paloittain runkoa kuvaava malli voidaan rakentaa siten, että eri rungon osia kuvaavat eri pyörähdyskappaleisiin perustuvat mallit, jotka yhdistetään yhdeksi saumattomaksi runkokäyräksi (Maltamo ja Laukkanen 2001). Perezin ym. (1990) mallissa puun tyveä kuvattiin neiloidilla ja loppurunkoa paraboloidilla. Pyörähdyskappaleiden vaihtumiskohtana, eli mallin käännepisteenä, käytettiin vakioitua suhteellista korkeutta. Rinnankorkeutta käännepisteenä on käyttänyt esimerkiksi Kozak (1997). Eerikäisen (2001) khasinmännylle (*Pinus kesiya*) laatima runkokäyrämalli perustui myös Kozakin (1997) esittelemään malliin.

Yhtenä vanhimmista jatkuviin yhtälöihin perustuvista runkokäyrämalleista on Höjerin (1903) malli (Maltamo ja Laukkanen 2001). Siinä vastemuuttujana käytetään puun pituuteen suhteutetun läpimitan suhdetta tietyllä korkeudella olevaan perusläpimittaan ja tätä suhdelukua estimoidaan epälineaarisella logaritmisella mallilla (Höjer 1903 viitattu Laasasenaho 1982). Höjerin mallista on laadittu useita eri versioita, jotka ovat poikenneet toisistaan muun muassa käytettyjen perusläpimittojen korkeuden perusteella ja yhtälön muodon perusteella (kts. Fries ja Matern 1965; Peters 1971; Pöytäniemi 1981; Kozak 1988).

Läpimittayhtälöihin perustuvat runkokäyrämallit perustuvat useampaan eri malliin, joista jokainen ennustaa yhden läpimitan eri korkeudelle puun runkoa (Maltamo ja Laukkanen 2001). Ennustetuista läpimitoista voidaan tämän jälkeen interpoloida yhtenäinen runkokäyrä esimerkiksi splini-interpolointia käyttäen (kts. Lahtinen ja Laasasenaho 1979). Läpimittayhtälöihin perustuvat mallit voidaan rakentaa simultaanisiin yhtälöryhmiin perustuen (Kilkki ym. 1978). Simultaaniyhtälöt ovat yhtälöryhmiä, joissa olevat yhtälöt sisältävät osin samoja tuntemattomia muuttujia. Esimerkiksi Kilkin ym. (1978) simultaaniyhtälöt estimoivat runkokäyrän rinnankorkeusläpimitan, puun pituuden ja latvusrajan korkeuden perusteella. Kilkin ym. (1978) simultaaniyhtälöt perustuivat lineaarisiin yhtälöryhmiin. Suorituskyvyltään lineaarisia yhtälöitä paremmiksi havaittiin epälineaariset yhtälöt (Kilkki ja Varmola 1981). Laasasenaho (1982) jatkokehitti epälineaarisia simultaaniyhtälöitä siten, että jokaista suhteellisen korkeuden läpimittaa ennustaa sitä edeltänyt ja seuraava suhteellinen läpimitta.

Laasasenaho (1982) havaitsi, että polynomimuotoiset jatkuvat yhtälöt toimivat runkokäyrän ennustamisessa aavistuksen paremmin, kuin yhtälöryhmiin perustuvat läpimittamallit. Polynomifunktion etuna on myös sen laskennallinen keveys verrattuna simultaaniyhtälöihin (Maltamo ja Laukkanen 2001). Näiden tekijöiden vuoksi Laasasenahon (1982) runkokäyrämalli on nykyään käytössä lähes kaikissa inventoinnin laskentajärjestelmissä Suomessa, jotka laskevat puutavaralajeittaisia runkotilavuuksia (Maltamo ja Laukkanen 2001). Runkokäyrämallia käytetään myös muun muassa hakkuukoneiden apteerausalgoritmissa (Ahonen 1996).

Laasasenahon (1982) runkokäyrämallin tausta-ajatus rakentuu Höjerin mallin pohjalle. Mallissa perusläpimittana käytetään läpimittaa 20 % korkeudella suhteessa puun pituuteen ja mallin muotona on korkeaa astetta oleva polynomi. Malli perustuu fibonaccin lukujonoon, josta selittävien muuttujien potenssit ovat peräisin. Korkean asteen polynomi on rakenteeltaan niin notkea, että se taipuu kuvaamaan koko rungon muotoa aina tyveltä latvaan. Laasasenaho (1982) sovitti mallin männylle, kuuselle ja koivulle. Saman mallin on havaittu soveltuvan myös pienin muutoksin myös muillekin puulajeille (kts. Määttä 1987; Heinonen ym. 1986; Eerikäinen ym. 1999). Määttä (1987) sovitti mallin Tanzanian plantaaseiden sypresseille (*Cupressus lusitanica*) ja männyille (*Pinus patula*). Heinonen ym. (1996) käytti mallia Zambian puuplantaaseilla ja Eerikäinen ym. (1999) niin ikään afrikkalaisen plantaasin eukalyptyspuille (*Eucalyptus cloeziana*). Tietävästi Laasasenahon (1982) runkokäyrämalli on Suomessa sovitettu myös lepälle, haavalle ja lehtikuuselle, mutta näitä malleja ei ole koskaan julkaistu (Salminen 1993; Korhonen ym. 2017).

Laasasenahon (1982) runkokäyrämalli soveltuu käytettäväksi eri kokoisille puille, sillä malli skaalautuu oikeaan mittakaavaan puun rinnankorkeusläpimitan perusteella. Mallissa on havaittu olevan kuitenkin perusmuodossaan jonkin verran harhaisuutta, joka johtuu mallissa olevasta oletuksesta, että puussa on koosta riippumatta eri korkeuksien läpimittojen suhteet 20 % korkeuden läpimittaan samat kaikilla (Maltamo ja Laukkanen 2001). Suhde ei ole kokonaan puun koosta riippumaton ja sen vuoksi Laasasenaho (1982) laati runkokäyrämalliin korjauspolynomin, joka oikaisee runkokäyrän huomioimaan puun koon vaikutuksen runkomuotoon.

Puun runkokäyrää pyritty mallintamaan myös käyttämällä napakoordinaatistoon perustuvaa mallia, jossa rungon läpimitta esitetään kulman funktiona (Lappi 1986). Napakoordi-

naatiston etuna muihin malleihin verrattuna on, että puun pituutta ei tarvitse olettaa tunnetuksi mallin sovellustilanteessa (Maltamo ja Laukkanen 2001). Lapin (1986) malli koostui 14 erillisestä mallista, joista 12 ennusti eri kulmia vastaavia läpimittoja, 1 puun pituutta ja 1 latvusrajan korkeutta. Yhtälöt käyttivät selittävinä muuttujina puun kokoa, puun neliötä ja metsikon puiden keskimääräistä kokoa. Mallin on havaittu olevan vähintäänkin yhtä luotettava, kuin Laasasenahon (1982) polynomimuotoinen runkokäyrämalli, kun sitä käytetään tilanteessa, jossa kaikkien puiden pituudet ja rinnankorkeusläpimitat ovat tunnetut (Korhonen 1991). Sovellustilanteessa kuitenkin harvemmin tunnetaan kaikkien puiden pituuksia ja rinnankorkeusläpimittoja. Kalibroitaessa malli koepuiden avulla kuvaamaan metsikkökohtaista runkokäyrää johtaa malli harhaisiin tuloksiin ennustettaessa tilavuus pelkän rinnankorkeusläpimitan avulla (Maltamo ja Laukkanen 2001).

Runkokäyrämalleja on kehitetty monia erilaisia, mutta on tärkeää muistaa, että yhdelle maantieteelliselle alueelle hyväksi havaitut mallit eivät välttämättä ole luotettavia toisella maantieteellisellä alueella. Puun runkomuotoon vaikuttavat puulaji, maantieteellisyys, ilmasto ja metsätaloudelliset asiat, kuten miten paljon tilaa puulla on kasvaa. Vertailututkimukset osoittavat, että suosittujen mallien suorituskyyvyssä esiintyy suurta vaihtelua silloin kun malleilla ennustetaan eri alueella, jonne mallit ovat laadittu (kts. Rojo ym. 2005; Li ja Weiskittel 2010). Tämän vuoksi mallit eivät välttämättä ole täysin luotettavia yksittäisen puun tai metsikön tasolla. Alueelle soveltumattomat mallit ovat antaneet jopa 30 % virheitä tilavuuden estimaateissa (Harry ym. 2002).

1.3.2 Tilavuusmallit

Puun tilavuudella tarkoitetaan Kankaan ym. (2011) mukaan ylimmän puun kaatoa haittaavan juurenniskan yläpuolelle jäävän rungon osan tilavuutta. Tunnuksena se on hankala tai lähes mahdoton mitata perinteisillä menetelmillä puun ollessa pystyasennossa. Perinteinen mittaaminen vaatisi käytännössä kiipeämistä puuhun mittanauhan ja mittasaksien kanssa, jotta puu voitaisiin kuutioida sen ollessa pystyssä. Tunnuksena runkotilavuus on kuitenkin usein kiinnostuksen kohteena, sillä sen perusteella voidaan määrittää puun arvo. (Kangas ym. 2011)

Tilavuuden on havaittu olevan vahvassa riippuvuudessa sekä rinnankorkeusläpimitan, että puun pituuden kanssa (Kangas ym. 2011). Sitä on pyritty johtamaan erilaisilla malleilla hyödyntäen esimerkiksi erilaisten pyörähdyskappaleiden, kuten kartion, neiloidin tai paraboloidin, tilavuuden laskentakaavoja. Tilavuusmalleissa voidaan malli rakentaa siten, että siinä oletetaan esimerkiksi puun tyven olevan muodoltaan neiloidi, puun keskiosa katkaistu kartio ja latvaosa paraboloidi (Kangas ym. 2011).

Yleisin selittävä muuttuja tilavuusmallissa on puun rinnankorkeusläpimitta, koska se on helposti ja edullisesti mitattavissa maastossa. Puun tilavuus on myös vahvassa riippuvuudessa rinnankorkeusläpimitan kanssa. Ongelmaksi muodostuu riippuvuuden tyyppi, joka ei ole lineaarinen. Tämä aiheuttaa tilavuusmallissa niin kutsutun heteroskedastisuuden ongelman, jolla tarkoitetaan kasvavia variansseja (Maltamo ja Laukkanen 2001). Puun tilavuuden vaihtelu on tällöin sitä suurempaa, mitä suurempi puu on läpimitaltaan. Epälineaarista riippuvuutta voidaan pyrkiä linearisoimaan tekemällä vastemuuttujaan muunnos, joka vakioi varianssin. Tyypillisesti muunnoksena käytetään tällöin luonnollista logaritmia (Maltamo ja Laukkanen 2001).

Tilavuusmallin muotona on usein käytetty myös pituuden ja läpimitan toisen potenssin tuloa, jolla ennustetaan runkotilavuutta (kts. Avery ja Burkhart 1983; Knoebel ym. 1984 ja Amateis ja Burkhart 1987). Malli on perusmuodossaan lineaarinen muuttujiensa suhteen, mutta heteroskedastisuuden vuoksi malli tulee parametrisoida matemaattisten sääntöjen mukaisesti muunnetusta yhtälömuodosta (kts. Knoebel ym. 1984). Läpimitaan ja tilavuuteen perustuvia malleja on myös laadittu suoraan epälineaarisina, kuten muun muassa Honerin (1965) tilavuusyhtälö (Maltamo ja Laukkanen 2001). Mallin epälineaarista muotoa on käyttänyt muun muassa Reed ja Green (1984). Mallin linearisoitua muotoa on käyttänyt Eerikäinen (2001) ennustaessaan khasinmännyn kuorellisia kokonaistilavuuksia Afrikan viljelymetsissä.

Tilavuusmalli voidaan yksinkertaisimmillaan laatia pelkkään rinnankorkeusläpimitaan perustuvaksi, sillä läpimitta antaa usein melko hyvin informaatiota myös puun runkotilavuuden suuruudesta. Malli on kuitenkin tässä tapauksessa herkkä maantieteelliselle vaihtelulle, sillä puiden pituudet vaihtelevat alueittain. Lisäksi ainoana selittäjänä oleva läpimitta ei yksistään anna riittävästi tietoa puun runkomuodosta, jolloin malli voi olla harhainen sellaisella maantieteellisellä alueella, jonne sitä ei ole sovitettu. Rinnankorkeuslä-

pimittaan perustuvia tilavuusmalleja on laatinut Laasasenahon (1982) ohella muun muassa Korhonen (1994). Korhonen (1993) havaitsi, että rinnankorkeusläpimittaan perustuvan tilavuusmallin luotettavuutta suuraluetasolla voidaan parantaa lisäämällä malliin muuttujaksi lämpösumma tai etäisyys merestä. Mitä kauempana meri on ja mitä korkeampi lämpösumma on, niin sitä pidempiä ovat puut.

Tilavuusmallin luotettavuutta voidaan parantaa huomattavasti, kun lisätään malliin rinnankorkeusläpimitan ohella puun pituus. Malli johtaa runkotilavuuden rinnankorkeusläpimitan ja pituuden tulosta, jota korjataan erityisellä muotoluvulla, joka kuvaa puun runkomuotoa. Muotoluku on suhdeluku, joka lasketaan jakamalla puun tilavuutta pituuden ja pohjapinta-alan tulolla (Maltamo ja Laukkanen 2001). Jos muotoluku olisi lukuarvoltaan 1, niin puun runkomuoto vastaisi lieriötä, jos taas $1/6$, niin runkomuoto olisi kartiomainen. Muotoluvun arvo eri kokoisilla puilla ei kuitenkaan ole vakio. Tämän vuoksi tilavuusmallissa ilmenee harhaisuutta, kun rinnankorkeusläpimitta mitataan puun koosta riippumatta aina samalta kiinteältä korkeudelta. Pienellä puulla rinnankorkeusläpimitta mitataan lähes latvasta ja isolla puulla taas tyveltä. Tämän vuoksi muotoluvut olisivat teoreettisesta näkökulmasta perustellumpaa luoda suhteellisten korkeuksien perusteella, eikä absoluuttiselta korkeudelta mitatusta läpimitasta (Fehrmann ja Klein 2006).

Laasasenaho (1982) esitteli tutkimuksessaan kahden tunnuksen muotolukuun pohjautuvan tilavuusmallin, jossa tunnuksina käytetään rinnankorkeusläpimittaa ja pituutta. Malli koostuu kahdesta osasta, joista ensimmäinen estimoii kannon ja rinnankorkeuden välistä tilavuutta ja toinen rinnankorkeuden ja latvan väliin jäävän osan tilavuutta. Laasasenaho kuitenkin havaitsi, että tulomuotoisella allometrisellä tilavuusmalleilla saadaan parempia tuloksia, kuin muotolukuun pohjautuvalla mallilla. Tämä rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuva tilavuusmalli onkin nykyään Suomessa kaikista laajimmin käytetty tilavuusmalli. Malli voidaan muuntaa lineaariseen muotoon logaritmoinnilla, jolloin vastemuuttujana on mallissa tilavuuden luonnollinen logaritmi.

Kolmen tunnuksen tilavuusmalleista, jotka sisältävät rinnankorkeusläpimitan ja pituuden lisäksi jonkin lisätunnuksen, tärkeimpänä voidaan pitää Laasasenahon (1982) yläläpimittaan pohjautuvaa tilavuusmallia. Yläläpimitta on Suomessa vakiintunut tarkoittamaan 6 metrin korkeudelta mitattua puun läpimittaa. Tausta-ajatuksena mallissa on, että puun runkomuoto on kannosta rinnankorkeudelle saakka sylinteri, rinnankorkeudelta 6 metrin korkeudelle katkaistu kartio ja 6 metrin korkeudelta latvaan kartio. Mallin kertoimet ovat

estimoitu mallin ollessa muotolukumuodossa, jolloin yhtälön molemmat puolet ovat jaettu muotoluvulla (Maltamo ja Laukkanen 2001).

Yläläpimitan ohella lisätunnuksena on tilavuusmalleissa käytetty esimerkiksi latvusrajan korkeutta (kts. Kilkki ja Varmola 1981; Kilkki 1983). Laasasenaho (1982) havaitsi kuitenkin yläläpimitan antavan laadinta-aineistossa laadukkaampia ennusteita verrattuna latvusrajan korkeuden käyttämiseen. Ruotsissa latvusrajan korkeus on nykyään käytössä heidän sikäläisessä Valtakunnan metsien inventoinneissa käytetyissä tilavuusmalleissa (Maltamo ja Laukkanen 2001). Maltamon ja Laukkanen (2001) mukaan yhtenä latvusrajaa puoltavana perusteluna on sen helpompi ja luotettavampi mitattavuus maastossa verrattuna yläläpimitaan.

Tilavuusmalleja on myös kehitetty puun kokonaisrunkotilavuuden ohella myös ennustamaan esimerkiksi käyttöosan tilavuutta. Käyttöosa voi pitää sisällään esimerkiksi sahauskelpoisen rungon osan (kts. Amateis ja Burkhart 1987), jonka päättymiskorkeus voidaan rajata tiettyyn minimiläpimitan alittumiseen tai rungon tekniseen laatuun (Maltamo ja Laukkanen 2001). Esimerkiksi Burkhart (1977) hyödynsi tutkimuksessaan Honerin (1965) mallia, jolla estimoiduista kokonaistilavuuksista laadittiin malli ennustamaan käyttöosan tilavuutta. Tilavuusmalleja voidaan myös laatia ennustamaan myös esimerkiksi puun sydänpuun tilavuutta (Flæte ja Høibø 2009).

Metsänarvioinnin kannalta merkittävimpien tilavuusmallien joukkoon voidaan lukea Laasasenahon (1982) kehittämät runkokäyrä- ja tilavuusmallit. Laasasenaho (1982) laati mallit hyvin laajan, 1960- ja 1970-lukujen vaihteessa kerätyn runkoanalyysiaineiston pohjalta, joka sisälsi 2000 mäntyä, 1800 kuusta ja 800 koivua. Nämä mallit ovat edelleen käytössä niin tutkimuksessa, metsän kasvua simuloivissa ohjelmistoissa, Valtakunnan metsien inventoinnissa ja käytännön metsäsuunnittelussa. Laasasenahon (1982) tilavuusmallit ovat sovitettu myös muille puulajeille, kuten lepälle, haavalle ja lehtikuuselle, vaikkakaan näitä malleja ei ole koskaan julkaistu (Salminen 1993; Korhonen ym. 2017). Valtakunnan metsien inventoinneissa on hyödynnetty Laasasenahon (1982) kolmen tunnuksen tilavuusmallia aina 80-luvulta lähtien (Salminen 1993). Malleja on käytetty myös sellaisille puulajeille, joille niitä ei ole lähtökohtaisesti sovitettu ja esimerkiksi koivun malleilla on ennustettu muidenkin lehtipuiden, kuin koivun tilavuuksia (Salminen 1993).

1.4 Maastolaserkeilaus

Laserkeilaus on 2000 -luvulla näytelty merkittävää roolia metsien inventointia käsittelevässä tutkimuksessa, sekä käytännön metsäinventointisovelluksissa. Laserkeilauksen toimintaperiaate perustuu ympäristöön heijastettaviin miljooniin lasersäteisiin, jotka osueensa kohteeseen kaikuvat siitä takaisin säteen lähettäneeseen keilaimeen (Holopainen ym. 2013a). Palanneesta laserkaiusta voidaan kulman ja valonnopeuden avulla laskea millimetrin tarkkuudella heijastuspisteen koordinaatit (x, y, z) ja sitä kautta rakentaa ympäristöstä tarkka kolmiulotteinen malli. Laserkeilaus on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, eli se on itsevalaiseva, eikä siten ole riippuvainen auringon säteilyn voimakkuudesta. Itsevalaiseminen on etu myös siitä syystä, että heijastuspisteen koordinaattien johtamisessa ei tarvita stereomittauksia, mikä näkyy lasersäteen latvustonläpäisykyvyssä. Lentolaserkeilauksella saadaan puuston korkeus mitattua, vaikka puusto olisikin tiheää. Suomessa operatiivinen lentolaserkeilaus alkoi 2010-luvulla ja nykyään kaikki Suomen metsät ovat keilattu (Maanmittauslaitos 2018).

Lentolaserkeilaus toteutetaan nimensä mukaisesti lentokoneesta käsin, mutta yhtä hyvin laserkeilain voidaan tuoda maanpinnan tasolle ja toteuttaa liikkuvasta autosta, veneestä tai mönkijästä käsin (Holopainen ym. 2013b). Maastolaserkeilaus on sitä vastoin maanpinnan tasolta, yleensä kolmijalan päältä, tapahtuvaa laserkeilausta (Holopainen ym. 2013a). Toteutustapansa vuoksi maastolaserkeilaimessa ei tarvita keilausta suoritettaessa erillistä GPS (Global Positioning System) -laitteistoa paikantamiseen tai IMU (Inertial Measurement Unit) -laitteistoa mittaamaan keilaimen kallistuskulmaa, kiihtyvyyttä ja asentoa (Holopainen ym. 2013a).

Maastolaserkeilausta on käytetty aikaisemmin esimerkiksi arkeologisten kohteiden ja rakennusten kolmiulotteiseen mallintamiseen (Dassot ym. 2011). Metsäaiheisissa tutkimuksissa maastolaserkeilauksella kerättyä aineistoa on hyödynnetty yksittäisestä puusta tehtyihin mittauksiin (kts. Hopkinson ym. 2004) ja koealatasolla tehtäviin puuston tunnusten mittaamiseen (kts. Liang ym. 2018). Useita tutkimuksia on tehty optimaalisen pistepilven keräämistävän löytämiseksi. Pistepilvi voidaan kerätä tekemällä koepuusta, tai koealasta yksittäinen keilaus (Liang ym. 2012). Keilauksia voidaan myös tehdä useampia ja yhdistää niistä saadut pistepilvet yhdeksi kattavammaksi pistepilveksi referenssikohdeiden avulla (Liang ja Hyyppä 2013). Pistepilvien sisältämä informaatio voidaan myös

yhdistää vasta tunnuslukutasolla, jolloin yksittäisistä keilauksista erikseen mitatuista tunnuksista lasketaan tunnuslukujen keskiarvot (Saarinen ym. 2017).

Yhtenä haasteena ja siksi myös runsaasti tutkittuna asiana maastolaserkeilaustutkimuksessa on ollut koealatasolla puiden kartoittaminen ja tunnistaminen. Täydellisen pintaalaan sidotun koealatiedon saavuttamisen edellytyksenä on, että kaikki koealalla olevat puut voidaan mitata. Maastolaserkeilatussa pistepilvessä haasteena ovat kuitenkin siihen muodostuvat katvealueet, jotka syntyvät isompien puiden peittäessä pienemmät puut taakseen. Tästä syystä eri lähestymistapoja ja puiden kartoittamisen tarkkuuksia on tutkittu useassa tutkimuksessa Suomessa ja ulkomailla (kts. Lovell ym. 2011; Liang ym. 2011; Liang ym. 2012; Holopainen ym. 2013b; Liang ja Hyypä 2013; Kankare ym. 2015).

Myös puulajin määrittäminen pistepilvestä on osoittautunut hankalaksi, sillä vaikka puustosta saadaan hyvin yksityiskohtainen kolmiulotteinen malli, niin puulajien tunnistaminen automaattisesti ei ole helppo tehtävä tietokoneelle. Kaikki laserkeilaimet eivät myöskään tallenna keilatuista kohteista värikuvia, jolloin puiden sävyarvoja ei ole voitu käyttää puulajin tunnistukseen. Puulajin määrittäminen on lähestytty muun muassa puulajien yksilöllisiin kaarnan muotoihin perustuen (Othmani ym. 2014) ja hyödyntäen puulajien yksilöllisiä mittasuhteita ja ulkomuotoa käsittelemällä niitä tilastotieteellisin menetelmin (Lin ja Herold 2016). Uusien hyperspektraalisten keilaimien tultua markkinoille on myös puulajin tunnistusta käsitteleviä tutkimuksia tehty niitä käyttäen (Puttonen ym. 2010; Douglas ym. 2015).

Maastolaserkeilausta on myös hyödynnetty metsäekologiaan liittyvissä tutkimuksissa. Esimerkiksi Hopkinson ym. (2013) ja Zheng ym. (2013) käyttivät maastolaserkeilausta lehtipinta-alaindeksin (LAI) määrittämisessä. Myös latvusaukkoja (gap fraction) koskevaa tutkimusta on tehty (kts. Danson ym. 2007; Cifuentes ym. 2014) ja myös latvuston kykyä absorboida auringon säteilyä on mitattu maastolaserkeilaimella kerätystä aineistosta (Van der Zande ym. 2011). Lisäksi esimerkiksi latvuston rakennetta (Moorthy ym. 2011; Bayer ym. 2013) ja lehtipinta-alan jakautumista latvuston sisälle (Béland ym. 2011) koskevaa tutkimusta on tehty. Myös puuston harsuuntumista eri ajankohtien välillä on tutkittu maastolaserkeilausta käyttäen ja tutkimuksessa on havaittu puusta sironneiden laserpisteiden määrän vähentymisen korreloivan lähes täydellisesti puun vähentyneen biomassan suhteen (Kaasalainen ym. 2010).

Rinnankorkeusläpimitta ja pituus

Metsätaloudellisesti tärkeimmät tunnuksset ovat perinteisesti olleet yksittäisen puun tapauksessa rinnankorkeusläpimitta, pituus ja tilavuus, sekä koko metsikön tasolle yleistettynä vastaavat summa ja keskitunnukset. Myös näitä koskevaa tutkimusta maastolaserkeilaukseen liittyen on ehditty tekemään runsaasti. Koska kyseiset puu- ja puustotunnukset ovat metsätaloudellisesti tärkeitä, ohjaavat ne myös maastolaserkeilaustutkimusta siihen suuntaan, että tunnuksset voitaisiin pistepilvestä kustannustehokkaasti mitata.

Lähes jokaisessa tutkimuksessa, jossa maastolaserkeilausta on käytetty metsien mittauksissa, on raportoitu läpimitan mittaustarkkuuksia, jotka ovat keskimäärin hyvin lupavia. Esimerkiksi Hopkinson ym. (2004) raportoi läpimitan keskivirheeksi 1 cm ja Henning ja Radke (2006) 4,7 cm. Watt ja Donoghue (2005) raportoivat läpimitaestimaattien 4 cm aliarvion suhteessa referenssimittauksiin. RMSE:llä mitattuna valtaosa tutkimuksista on raportoinut mittaustarkkuuden olevan alle 5 cm tasolla (Maas ym. 2008; Tansey ym. 2009), mutta myös sitä alempia tarkkuuksia on tutkimuksissa esitetty, kuten 9,17 cm (Huang ym. 2011).

Suomessa raportoidut rinnankorkeusläpimitan tarkkuudet ovat olleet pääasiassa alle 1,5 cm RMSE:llä mitattuna (Liang ym. 2012; Kankare ym. 2013; Kankare ym. 2014; Liang ym. 2014; Kankare ym. 2015; Saarinen ym. 2017). Kaupunki ja puisto-olosuhteissa kasvaneet puut ovat runkomuodoltaan monimuotoisempia, kuin metsässä kasvaneet männyt ja kuuset. Siksi puistopuiden läpimitoissa voi olla havaittavissa enemmän mittausrvirhettä, sillä puun runkomuoto ei aina ole täysin pyöreä. Puistopuilla läpimitan mittaustarkkuutta on tutkinut muun muassa Saarinen ym. (2014), joka sai läpimitat mitattua pistepilvestä noin 4-7 cm tarkkuudella.

Puun pituus ei ole yhtä luotettavasti mitattavissa maastolaserkeilatusta pistepilvestä, kuin läpimitta. Tämä johtuu osin korkeudesta, jolta keilaus suoritetaan mutta myös keilauskulmasta (Vauhkonen ym. 2013). Vaikka maastolaserkeilauksen pistetiheydet ovat suuria, niin siitä huolimatta puun latva on usein korkeimmasta kohdastaan niin pieni, ettei laserkaikuja saada siitä saakka. Tämän seurauksesta pituusestimaatit ovat usein systemaattisia aliarvioita. Metsäisissä olosuhteissa myös muiden puiden aiheuttamien katvealueiden on usein havaittu vaikuttavan pituusmittauksen tarkkuuteen (Vauhkonen ym. 2013). Pituuden mittaustuloksissa tarkkuudessa puhutaan senttimetrien sijaan metreistä. Esimerkiksi Huang ym. (2011) sai pituuden tarkkuudeksi (RMSE) noin 0,95 metriä ja Hopkinson ym.

(2004) 1,5 metriä. Maas ym. (2008) sai pituuden tarkkuudeksi 4,05 metriä (RMSE) ja poistettuaan kaksi ilmiselvää poikkeavaa havaintoa, niin tarkkuus parantui ainoastaan noin 2 metrin tasolle. Moskal ja Zheng (2012) mittasivat kaupunkiolosuhteissa kasveista puista pituudet 0,75 metrin tarkkuudella (RMSE).

Suomessa taas pituuden mittaustarkkuudet ovat RMSE:llä mitattuna vaihdelleet noin 1,5-3 metrin välillä ollen aina systemaattisesti noin 1-2 metrin verran aliarvioita (Kankare ym. 2013; Kankare ym. 2014; Saarinen ym. 2017). Yhtenä poikkeuksena on ollut Liangin ja Hyypän (2013) tutkimus, jossa pituudet olivat noin 1,3 metrin verran yliarvioita. Wangin ym. (2019) mukaan maastolaserkeilauksen pistepilvestä saadaan mitattua luotettavasti pituudet, kun puut ovat 15-20 metrin mittaisia. Tätä pidemmällä puilla pituuden virheet alkavat merkittävässä määrin kasvaa.

Runkokäyrä ja tilavuus

Runkokäyrän mittaamista pistepilvestä on käsitelty aikaisemmin vain muutamissa tutkimuksissa. Läpimittojen mittaaminen manuaalisesti pistepilvestä on hyvin työlästä. Tästä syystä mittausten suorittamiseksi on kehitetty automaattisesti toimivia algoritmipohjaisia menetelmiä. Uusimmissa tutkimuksissa esiteltyt automaattiset menetelmät (kts. Liang ym. 2014; Saarinen 2017) ovat osaltaan mahdollistaneet runkokäyrän mittaamisen tarkemmin, kuin olemassa olevia runkokäyrämalleja käyttämällä (Liang ym. 2014). Runkokäyrän mittaaminen voisi tulevaisuudessa mahdollistaa tilavuuden mittaamisen ohella myös puun osituksen tukki- ja kuituositteeseen, koealatasolla runkokäyrä- ja tilavuusmallien sovittamisen paikallisiin olosuhteisiin ja toisaalta myös uusien mallien luomisen (Liang ym. 2016).

Runkokäyrän mittaaminen maastolaserkeilatusta pistepilvestä on tutkimuksissa ollut ensimmäisen kerran esillä 2000-luvun alkupuolella (kts. Thies ym. 2004; Pfeifer ja Winterhalder 2004). Tämän jälkeen esimerkiksi Henning ja Radtke (2006) tutkivat runkokäyrän mittaamista ja pari vuotta myöhemmin myös Maas ym. (2008). Kummassakin tutkimuksessa runkokäyrä saatiin mitattua pistepilvestä ensimmäisten elävien oksien korkeudelle saakka. Pfeifer ja Winterhalder (2004), Maas ym. (2008) ja Liang ym. (2011) esittelivät menetelmän, jolla voidaan mitata puun runkokäyrä automaattisesti pistepilvestä. Suomessa yhtenä ensimmäisistä runkokäyrää käsittelevistä maastolaserkeilaustutkimuksista oli juuri Liangin ym. (2011) tutkimus, jossa puun runko mallinnettiin pistepilvestä. Sittemmin menetelmällistä puolta on kehitetty pidemmälle esimerkiksi Liangin ym. (2014) tutkimuksessa. Raumonon ym. (2013) onnistuivat viemään runkokäyrän mallintamisen

vielä yksityiskohtaisemmalle tasolle mallintaessaan rungon ohella myös puun oksat pistepilvestä automaattisesti.

Runkokäyrää käsittelevissä tutkimuksissa runkokäyrän mittaamisen tausta-ajatus on saada riittävän paljon läpimittoja mitattua rungon pistepilvestä, jotta runkokäyrän muoto voidaan kuvata riittävän yksityiskohtaisesti. Yhtenä runkoläpimittoihin liittyvänä hyvyysmittarina onkin käytetty sitä, miten korkealle puun rungolla on onnistuttu mittaamaan läpimittoja suhteessa mitattavan puun pituuteen. Esimerkiksi Liang ym. (2014) raportoi mitanneensa automaattisesti läpimittoja aina 75 % korkeudelle saakka. Keskimäärin he saivat männyillä läpimittoja 66 % suhteelliselle korkeudelle saakka ja kuusilla 61 % suhteelliselle korkeudelle. Pistepilvestä mitattujen läpimittojen määrää on myös tutkimuksissa kuvattu laskemalla saatujen läpimittaestimaattien lukumäärä suhteessa puun pituuteen ja sitä kautta laskettuun teoreettiseen läpimittahavaintojen maksimimäärään. Teoreettinen läpimittojen maksimimäärä voidaan laskea, kun tiedetään puun pituus ja estimoitujen läpimittahavaintojen korkeusväli. Kankare ym. (2013) mittasi läpimittoja männyillä keskimäärin 87 % ja kuusilla 48 % teoreettisesta läpimittojen maksimimäärästä.

Pistepilvestä mitatun runkokäyrän ja sitä kautta lasketun runkotilavuuden tarkkuuden on mainittu tutkimuksissa olevan noin 30 dm^3 tasolla (Liang ym. 2014; Saarinen 2017). Liang ym. (2014) sai automaattisella menetelmällään runkokäyrän kautta lasketuksi runkotilavuuden harhoiksi männyillä $-0,9 \text{ dm}^3$ ja kuusilla $-12,5 \text{ dm}^3$. Vastaavasti RMSE:llä mitattuna tarkkuudet olivat männyillä 24 dm^3 (8,9 %) (RMSE) ja kuusella 35 dm^3 (9,8 %). Astrup ym. (2014) mittasi automaattisilla menetelmillä pistepilvestä tilavuudet kuusille, männyille ja koivuille ja vertaili saatuja tilavuuksia harvesterilla tehtyihin referenssitilavuuksiin. Käytettäessä tilavuusmittauksen pohjalla ainoastaan yksittäistä keilausta koepuusta oli tilavuusennusteissa harhaa 68 dm^3 kuusella, 15 dm^3 männyllä ja 24 dm^3 koivulla. RMSE:llä mitattuna tarkkuudet olivat 175 dm^3 , 132 dm^3 ja 76 dm^3 .

Saarinen ym. (2017) tutki runkokäyrän mittaamisen laatua eri etäisyyksillä ja perustuen yksittäiseen keilaukseen (A), kahteen erikseen prosessoituun keilaukseen (B) ja kahteen yhdistettyyn keilaukseen (C). Tilavuusmittauksen tulokset osoittivat keilausetäisyyden osalta, että tilavuuden estimointitarkkuus oli paras noin 25-50 % etäisyydellä suhteessa puun pituuteen. Tilavuuden mittaustarkkuus oli noin $20\text{-}30 \text{ dm}^3$. (8 %) (RMSE) puun koosta riippumatta. Verrattaessa pistepilvien prosessointitapaa, saatiin A-vaihtoehdolla

44 % läpimitoista suhteessa puun pituuteen, B-vaihtoehdolla 53 % ja C-vaihtoehdolla 61 % keskimäärin. Saarinen ym. (2017) huomasi, että 25-50 % keilausetaisyys suhteessa puun pituuteen oli paras tilavuusennusteiden luotettavuuden kannalta ja käytettäessä kahta erillistä keilausta (B) olivat saadut tilavuusennusteet muita tasaisemmat.

Tilavuuden ennustamista pistepilvestä on tehty myös useammassa tutkimuksessa perustuen olemassa oleviin runkokäyrä- ja tilavuusmalleihin. Muun muassa Kankare ym. (2013), Vauhkonen ym. (2013) ja Kankare ym. (2014) ennustivat tilavuudet pistepilvestä mitatuilla läpimitoilla ja Laasasenahon (1982) runkokäyrä- ja tilavuusmallien käyttäen. Myös Liang ym. (2014) vertasi automaattisesti suoraan pistepilvestä mitattuja runkotilavuuksia Laasasenahon (1982) tilavuusmalleilla laskettuihin tilavuuksiin.

Maastolaserkeilauksella kerätystä pistepilvestä on myös tutkittu koko puun biomassan estimoimista Repolan (2008; 2009) mallien avulla (Kankare ym. 2013; Tanhuanpää ym. 2017a) ja suoraan automaattisilla algoritmeilla (Calders ym. 2015). Myös erilaisia laatu-tunnuksia, kuten puiden oksikkuutta, oksien kulmia ja oksarajan korkeutta on tutkittu maastolaserkeilaukseen perustuen (Pyörälä ym. 2018a). Pyörälä ym. (2018b) pystyivät mittaamaan maastolaserkeilauksella kerätystä pistepilvestä tukkipuun laatua ja sen geometriaa vastaavalla tarkkuudella, kuin sahoilla tehtävissä mittauksissa.

1.5 Tutkimuksen tavoite

Maastolaserkeilauksen ja pistepilven käsittelyn kehittyminen ovat mahdollistaneet yksityiskohtaisen rungon läpimittatiedon keräämisen koepuista kaatamatta niitä, mikä voi tarjota uudenlaisen mahdollisuuden mallintamisessa käytettävän koepuuaineiston keräämiseen (Liang ym. 2014; Liang ym. 2016). Aikaisemmat tutkimukset osoittavat pistepilvestä mitattujen läpimittojen tarkkuuden olevan korkea ja pistepilvestä estimoidun runkokäyrän mahdollistavan luotettavien runkotilavuusestimaattien laskemisen (Liang ym. 2012; Kankare ym. 2013; Kankare ym. 2014; Liang ym. 2014; Astrup ym. 2014; Saarinen ym. 2017). Metsäalalla mallintaminen ja mallipohjaiset sovellukset ovat aina olleet hyvin yleisiä ja niitä on kehitetty ennustamaan sellaisia tunnuksia, joita maastossa on ollut kustannustehotonta mitata. Puun runkokäyrä ja tilavuus ovat esimerkkejä tällaista tunnuk-

sista, jotka ovat hyvin keskeisiä, niin puun rahallisen arvon, kuin käyttöarvonkin määrittämisessä (Maltamo ja Laukkanen 2001). Suomessa yleisimmät näitä tunnuslukuja ennustavat mallit ovat olleet Laasasenahon (1982) männylle, kuuselle ja koivulle kehittämät mallit.

Tässä tutkimuksessa halutaan selvittää maastolaserkeilauksella kerätyn pistepilven käytökeloisuutta mallien sovittamiseen käytettävän aineiston keruussa. Tavoitteena tutkimuksessa on sovittaa Laasasenahon (1982) runkokäyrä- ja tilavuusmallit Helsingin kaupungin katulehmuksesta koostettuun aineistoon. Laasasenahon (1982) mallit ovat valittu tutkimukseen, koska ne ovat Suomessa yleisessä käytössä niin tutkimuksessa, Valtakunnan metsien inventoinnissa kuin käytännön metsäsuunnittelussakin. Vastaavasti katulehmukset valittiin sovituksen kohteena olevaksi puulajiksi, koska malleja ei niille ole aikaisemmin sovitettu ja mallien avulla on mahdollista arvioida suuntaa antavasti Helsingin katupuuston sitoman hiilen määrää. Mallien sovittaminen maastolaserkeilauksella kerättyä pistepilveä hyödyntäen on myös ennen kaikkea arvokasta perustutkimusta, jolla voidaan kartoittaa aineistonkeruussa käytettävän menetelmän soveltuvuutta mallien sovittamiseen.

Tutkimuksen aineistosta puolet on kerätty lehdelliseen aikaan ja puolet lehdettömään aikaan. Tällä aineiston rakenteella pyritään vastaamaan kysymykseen, onko aineiston keräysajankohdalla merkitystä tilavuus- ja runkokäyrämallien sovituksen onnistumisen näkökulmasta. Lisäksi halutaan selvittää, millainen merkitys aineiston koolla on mallien sovittamisen onnistumisessa ja tätä tutkitaan sovittamalla mallin osa-aineistojen sijasta koko aineistoon.

Katulehmusten valintaan vaikuttavat moni tekijä. Ensisijaisena perusteluna on se, että Laasasenahon (1982) malleja ei ole tiettävästi vielä koskaan aikaisemmin lehmuksille sovitettu. Mallien sovittamista voidaan siis tältä osin pitää perustellusti uutena tutkimuksena. Toiseksi lehmukselle sovitettut mallit voisivat onnistuessaan toimia suuntaa-antavina arvioitaessa Helsingin katulehmuksiin ja puistolehmuksiin sitoutuneen hiilen määrää ja olla siinä mielessä uusi näkökulma kaupunkipuita koskevassa tutkimuksessa. Sovittamalla mallit lehmuksille, saadaan malleille lisäksi lähes 50 % osuutta vastaava peitto koko katupuupopulaatiossa ja siinä mielessä hiilitaseen arviointia voidaan ulottaa myös katupuustoon kokonaisuutena. Lehmusten valinta tutkittavaksi puulajiksi on myös otan-

tateoreettiselta kannalta edullista, sillä koepuiden valinnassa voidaan käyttää katupuurekisterin muodossa tietoa koko lehmuspopulaation rakenteesta. Tällöin koepuiden valinnassa voidaan huomioida populaation sisältämä vaihtelu ja valita tutkittava puujoukko niin, että se kuvaa koko populaatiota mahdollisimman hyvin.

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Helsingin kaupungin katupuurekisteri

Tutkimuksessa käytettiin pohjana Helsingin kaupungin katupuurekisteriä. Rekisteri on Helsingin kaupungin rakennusviraston viherosaston hallinnoima rekisteri, joka sisältää lukumääräisesti noin 20 000 puuta (Helsingin kaupungin rakennusvirasto 2014b). Katupuurekisteri on alkujaan tuotettu vuonna 1999 digitoimalla puut kaavakartoilta (Tanhuanpää ym. 2014). Rekisteriä on päivitetty muun muassa vuonna 2012 ja viimeisin päivitys on tehty kesällä 2016, jolloin se toteutettiin 3D-Virtuaalipuistot -tutkimusprojektin yhteydessä. Viimeisimmän päivityksen myötä rekisteri päivitettiin laajuudeltaan 23 113 puuhun (Tanhuanpää ym. 2017b).

Katupuurekisterissä koostuu kahdeksasta tunnuksesta (taulukko 2.1). Rekisterin puut ovat numeroitu juoksevasti. Jokaiselle rekisterissä olevalle puulle on määritetty sijainnit lentolaserkeilauksen kautta korkeinta kaikua vastaavat x-, ja y-koordinaateilla, sekä puusta saatujen kaikujen keskiarvoa vastaavilla x-, ja y-koordinaateilla. Rekisterissä sijaintien esittämisen tasokoordinaatistona on käytetty vanhaa Helsingin kaupungin erillis-koordinaatistoa, josta kaupunki on luopunut 1.12.2012 alkaen (Helsingin kaupunki 2012). Katupuurekisterin sijainnit muutettiin tämän tutkimuksen alussa ETRS-GK25 -tasokoordinaatistoon, jonka käyttäminen on tutkimuksessa helpompaa. Muunnokseen käytettiin kaupungin sivuillaan tarjoamia muunnoskaavoja (Helsingin kaupunki 2012). Rekisterissä on jokaista puuta vastaava puulaji, lentolaserkeilauksen kautta saatu pituustieto ja pituuden kautta mallinnettu läpimitta (Tanhuanpää ym. 2012).

Katupuurekisterin sisältämien puiden pituusestimaatin tarkkuudeksi Tanhuanpää ym. (2012) ovat raportoineet 1,28 metriä (RMSE, keskineliövirheen neliöjuuri). Lämpimittatiedot on mallinnettu käyttäen ei-parametrasta lähimmän naapurin mallinnusmenetelmää. Lämpimittaestimaattien tarkkuuden raportoidaan olevan keskimääräisesti 6,9 cm (RMSE).

Taulukko 2.1. Helsingin kaupungin katupuurekisterin sisältämät tunnuks.

Tunnus	Yksikkö
<i>Puunumero</i>	<i>Juokseva numero</i>
<i>X_korkein kaiku</i>	<i>Helsingin kaupungin erilliskoordinaatisto</i>
<i>Y_korkein kaiku</i>	<i>Helsingin kaupungin erilliskoordinaatisto</i>
<i>X_kaikujen KA</i>	<i>Helsingin kaupungin erilliskoordinaatisto</i>
<i>Y_kaikujen KA</i>	<i>Helsingin kaupungin erilliskoordinaatisto</i>
<i>Läpimitta</i>	<i>senttimetri</i>
<i>Pituus</i>	<i>metri</i>
<i>Puulaji</i>	<i>nimi</i>

Tässä tutkimuksessa käytettiin vuonna 2014 päivitettyä rekisteriä, joka sisältää kaiken kaikkiaan 19 782 puuta (taulukko 2.2). Yleisin katupuulaji Helsingin alueella on rekisterin mukaan selvästi puistolehmus (*Tilia x europaeus*) 45 % osuudella. Toiseksi yleisin on metsävaahtera (*Acer platanoides*) (12 %) ja kolmanneksi yleisin rauduskoivu (*Betula pendula*) (11 %). Katupuurekisterissä on eritelty puulajinimekkeitä yhteensä 75 kappaletta.

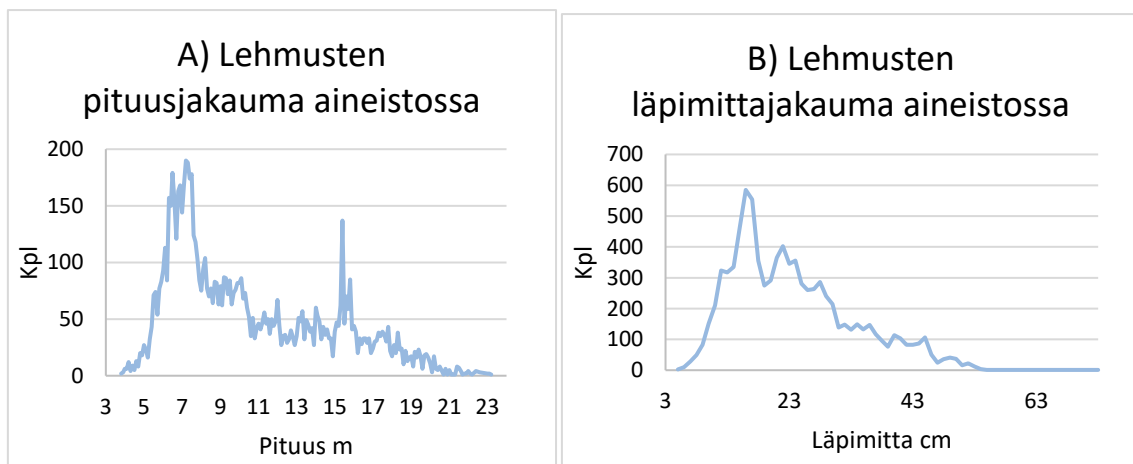
Taulukko 2.2. Katupuurekisterin kymmenen yleisintä puulajia. Oikealla lehmusten osuus rekisterissä.

Puulaji	Lukumäärä	%	Puulaji	Lukumäärä	%
<i>Puistolehmus</i>	8862	45 %	<i>Puistolehmus</i>	8862	98 %
<i>Metsävaahtera</i>	2433	12 %	<i>Lehmus</i>	113	1 %
<i>Rauduskoivu</i>	2176	11 %	<i>Isolehtilehmus</i>	17	0 %
<i>Vuorijalava</i>	1677	8 %	<i>Metsälehmus</i>	10	0 %
<i>Tammi</i>	682	3 %	Yhteensä	9002	100 %
<i>Kotipihlaja</i>	659	3 %			
<i>Ruotsinpihlaja</i>	529	3 %			
<i>Omenapuu</i>	240	1 %			
<i>Makedonianmänty</i>	237	1 %			
<i>Mustamarjaorapihlaja</i>	222	1 %			
<i>Muut</i>	2065	10 %			
Yhteensä	19782	100 %			

Katupuurekisteri sisältää yhteensä neljä nimekettä, jotka viittaavat lehmukseen ja sen Suomessa tavattaviin alalajeihin (taulukko 2.2). Lehmusten osuus koko katupuurekisteristä on prosentuaalisesti 45,5 %, joka osoittaa sen olevan katuistutuksissa hyvin yleinen. Lehmuksista yleisimpänä lajina on puistolehmus (*Tilia x europaea*), jonka osuus kaikista

on 98 % (taulukko 2.2). Isolehtilehmusta (*Tilia platyphyllos*) ja metsälehmusta (*Tilia cordata*) esiintyy myös katupuustossa, mutta vain marginaalisesti. Rekisterissä on lisäksi ”lehmus” -nimeke, jota vastaavat puut kuuluvat todennäköisesti johonkin edellä mainituista lajeista.

Kuvissa 2.1 on havainnollistettu puurekisterissä olevien lehmusten osalta lajeittain puukohtaisia läpimittoja sekä pituuksia. Tutkimuksessa päätettiin käsitellä puurekisterin lehmuksia yhtenä kokonaisuutena. Menettelytapaa on perusteltavissa sillä, että kaikki katupuurekisterin sisältämät lehmuslajit ovat kasvutavaltaan hyvin samankaltaisia ja muistutavat kooltaan toisiaan (Mossberg ym. 2012). Tutkimuksen tuloksena saatavan mallin tulisi lisäksi pystyä kuvaamaan katulehmuksia kokonaisuutena, eikä lajeittain eriteltynä. Katupuurekisterissä nimekkeenä esiintyvä ”lehmus” lisäksi antaa viitteitä siitä, että puurekisterin lajimääritykseen oikeellisuuteen olisi syytä varmuuden vuoksi suhtautua kriittisesti. Saattaa olla, että rekisterissä oleva puistolehmus onkin todellisuudessa metsälehmus ja niin edelleen. Siksi on perusteltua käsitellä puurekisterin lehmuksia tutkimuksessa puurekisterin mahdollistaman tarkkuuden rajoissa, eli yhtenä kokonaisuutena.



Kuva 2.1. Lehmusten pituuden (A) ja läpimitan (B) vaihtelu puurekisteissä.

2.2 Koepuiden valinta

Aineiston valinta tehtiin käyttäen kaikkia katupuurekisterissä olevia lehmuksia yhtenä ositteena. Otanta suoritettiin katupuurekisterissä olevien puiden läpimittatietojen pohjalta. Ennen otannan suorittamista aineistosta poistettiin kaikki lehmukset, jotka ovat läpimitaltaan alle 10 cm. Tämä tehdään, koska tutkimuksessa halutaan kohdentaa painopistealuetta suurempiin puihin, sillä muuten aineistoon voisi tulla mukaan vastikään istutettuja

pieniä puita, jotka eivät välttämättä anna luotettavaa kuvaa katupuustosta kokonaisuutena. Alle 10 cm läpimittaisten puiden poistamisen taustalla on lisäksi resurssien rajallisuus ja halu kohdistaa ne optimaalisesti. Alle 10 cm läpimittaan kuuluvia puita on määrällisesti katupuurekisterissä 171 kpl, joten niiden poisjättämisen jälkeen otannan pohjana olevan populaation kooksi muodostuu 8831 kpl (taulukko 2.3).

Taulukko 2.3. Puurekisterin lehmukset jaoteltuna läpimittaluokkiin alalajeittain. Puut ovat taulukossa esitetty kappalemääräisesti.

Läpimittaluokat (cm)	Isolehtilehmus	Lehmus	Metsälehmus	Puistolehmus	Yhteensä
5-9		2		169	171
10-19		46	4	3518	3568
20-29	2	38	4	3045	3089
30-39	10	9	2	1328	1349
40-49	4	14		709	727
50-59	1	4		89	94
60-69				1	1
70-73				3	3
Yhteensä	17	113	10	8862	9002

2.2.1 Koepuiden otanta ja lopullinen koepuuaineisto

Tutkimukseen kerättävän aineiston suuruudeksi asetettiin resurssien rajallisuuden vuoksi lukumääräisesti 76 kpl puita. Tavoitteena on mitata puolet aineistosta (38 kpl) lehdelliseen aikaan kesällä ja puolet (38 kpl) lehdettömään aikaan talvella. Lehdellisen ajan keilaukset suoritetaan kesä-elokuussa 2016 ja lehdettömän ajan keilaukset tammi-maaliskuussa 2017. Keilattavien puiden valitsemiseksi suoritetaan kaksi erillistä otantaa. Ensimmäisessä otannassa valitaan lehdelliseen aikaan keilattavaksi tarkoitetut puut ja toisessa otannassa lehdettömään aikaan keilattavat puut.

Otanta suoritetaan systemaattisesti perustuen läpimittaluokkiin. Läpimittaluokkia muodostetaan viisi kappaletta 10 cm välein (taulukko 2.4). Luokasta valittavien puiden määrä riippuu luokan suhteellisesta suuruudesta. Esimerkiksi läpimittaluokan 10-19 cm suhteellinen koko on 40 %, joten se muodostaa 40 % otoksen kokonaismäärästä (38 kpl). Suurimman läpimittaluokan (50-72 cm) koko on suhteellisesti niin pieni, että siihen ei tulisi

suoraan valituksi yhtäkään puuta. Sen vuoksi suurimman läpimittaluokan suhteen joudutaan poikkeamaan pyöristyssäännöistä ja pyöristämään luokan koko ylöspäin, jotta luokkaan saadaan myös yksi koepuu.

Taulukko 2.4. Lehdellisen ajankohdan koepuiden läpimittaluokkien sisältämien puiden määrät, niiden suhteelliset suuruudet ja läpimittaluokakohtaiset koepuiden määrät (otoskoko = 38 kpl).

<i>Läpimittaluokka (cm)</i>	<i>Puita läpimittaluokassa (kpl)</i>	<i>Luokan suhteellinen koko (%)</i>	<i>Otoksen koepuumäärä (kpl)</i>
10-19	3568	40 %	15
20-29	3089	35 %	13
30-39	1349	15 %	6
40-49	727	8 %	3
50-72	98	1 %	1
yhteensä	8831	100 %	38

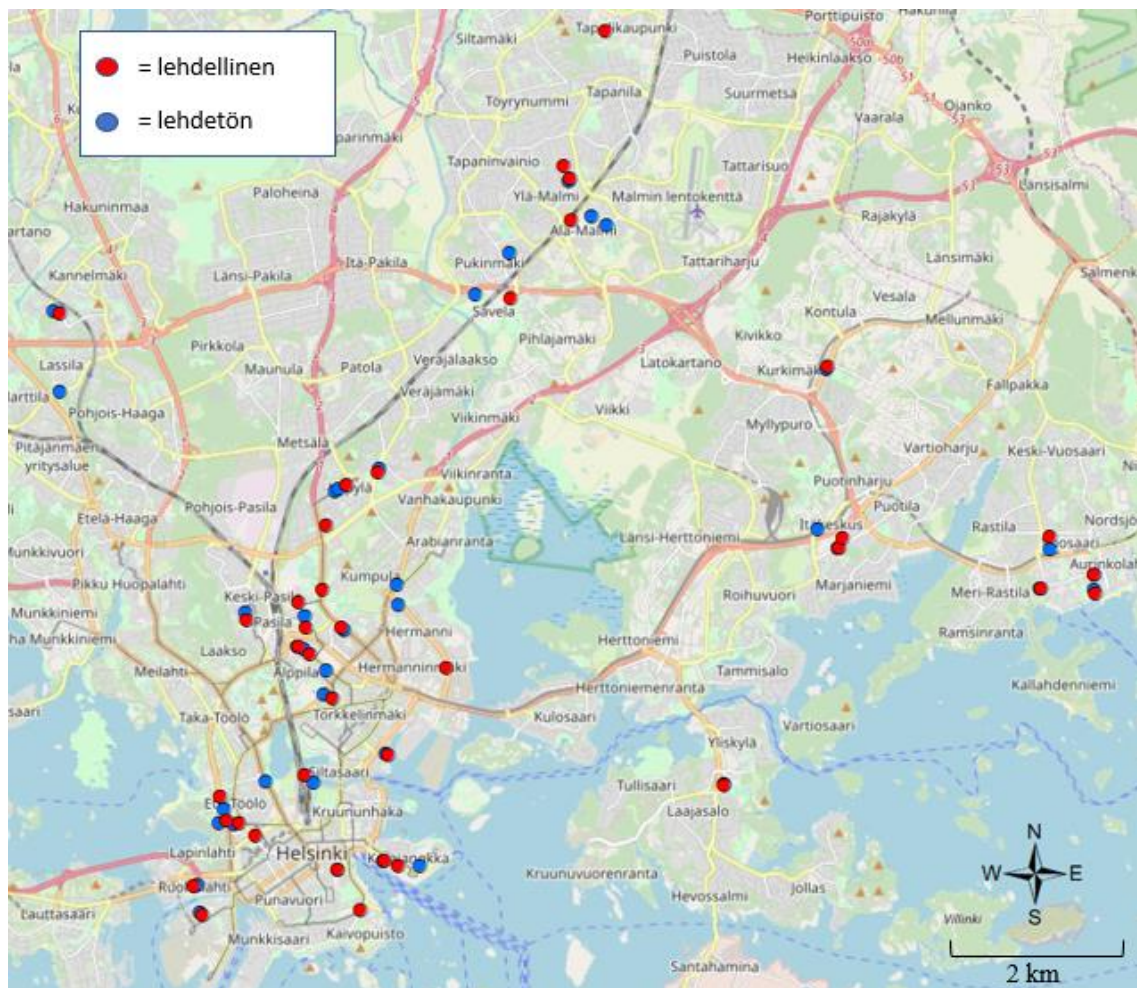
Läpimittaluokkien sisällä puut ovat satunnaisessa järjestyksessä. Jokaisesta luokasta valitaan taulukon 2.4 osoittama määrä puita aineistoon. Läpimittaluokittain määritetään luokkaa vastaava otantaväli (kaava 2.1) läpimittaluokan koon ja sitä vastaavan otoskoon avulla. Tämän jälkeen otokseen valittavat puut poimitaan aineistosta systemaattisesti (kaava 2.2). Lopputuloksena saadaan haluttu määrä puita otokseen. Suurimman läpimittaluokan (50-72 cm) ei voida käyttää otantaväliä, koska tähän läpimittaluokkaan valitaan ainoastaan yksi puu. Suurimmasta läpimittaluokasta valitaan aineistoon läpimittaan perustuen luokan mediaanipuu.

$$Otantaväli = \frac{\text{Läpimittaluokan koko (kpl)}}{\text{Läpimittaluokaa vastaavan otos (kpl)}} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ koepuu} &= \frac{\text{otantaväli}}{2} \\ 2 \text{ koepuu} &= \text{otantaväli} + \left(\frac{\text{otantaväli}}{2} \right) \\ 2 \text{ koepuu} &= 2 * \text{otantaväli} + \left(\frac{\text{otantaväli}}{2} \right) \\ n \text{ koepuu} &= n * \text{otantaväli} + \left(\frac{\text{otantaväli}}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Lehdettömän ajankohdan keilauksia varten otanta toteutetaan samalla periaatteella, kuin lehdellisen ajan keilauksia varten edellä kuvattiin. Ainoana poikkeuksena on kuitenkin, että ennen otantaa populaatiosta poistetaan lehdellisen ajan keilauksiin valitut puut (38 kpl). Tämä tehdään siksi, että otannassa ei tulisi valituksi samoja koepuita, kuin lehdellisen ajan keilauksia varten valittiin.

Kuvassa 2.2 on esitetty valittujen koepuiden maantieteellinen sijoittuminen Helsingin kaupungin alueelle. Eniten koepuita tuli määrällisesti valituksi ydinkeskustan tuntumasta. Tämä selittyy sillä, että katupuurekisterissä on määrällisesti eniten puita juuri ydinkeskustan alueella. Koepuiden maantieteellinen jakauma painottui otannassa katupuiden todellista maantieteellisiä painopistealueita vastaavasti. Koepuiden sijainti ei siten ole satunnainen, vaan riippuvainen katupuiden sijainnista kullakin maantieteellisellä alueella.



Kuva 2.2. Havainnekuva koepuuaineiston maantieteellisestä jakautumisesta Helsingin alueelle.

Lehdellisen ja lehdettömän ajan keilauksia varten valittiin myös varapuuaineisto, jos varsinaisten koepuiden mittaaminen estyy. Varapuiden määräksi valittiin subjektiivisen harkintaa käyttäen taulukossa 2.5 esitetyt määrät varapuita. Varapuita pyrittiin valitsemaan kattavasti kaikista läpimittaluokista.

Varsinaisista koepuista yksi puu jouduttiin mittausten yhteydessä korvaamaan varapuulla, koska sitä vastannutta tosiasiallista koepuuta ei ollut olemassa. Lehdelliseen ajankohtaan keilatuksi valituista koepuista jouduttiin jättämään kaksi koepuuta aineiston ulkopuolelle johtuen rungon oksaisuudesta ja siitä johtuvista katvealueista. Kahden koepuun poisjättämistä kompensoitiin ottamalla lehdettömän ajankohdan keilauksiin mukaan yksi ylimääräinen koepuu. Tällä saatiin nostettua lopullinen koepuuaineisto lukumääräisesti 75 koepuuhun.

Taulukko 2.5. Varapuiden määrät läpimittaluokittain.

Läpimittaluokka (cm)	Varapuit (kpl)
10-19	5
20-29	5
30-39	3
40-49	3
50-72	2
yhteensä	18

2.3 Maastomittaukset

2.3.1 Tutkimuksessa käytetty laserkeilain

Maastolaserkeilaimena käytettiin Leican HDS6100 (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland) vaihe-erokeilainta (kuva 2.3). Keilaimen käyttöetäisyydeksi valmistaja ilmoittaa enimmillään 79 metriä ja toimintasäde on horisontaalisesti 360 astetta ja vertikaalisesti 310 astetta. Keilaimen lähettämät lasersäteet ovat aallonpituudeltaan 690 nanometriä ja se pystyy tallentamaan 508 000 koordinaattipistettä sekunnissa. Tutkimuksessa käytetään keilaimen asetusta, jossa pisteiden keskimääräinen etäisyys toisistaan on 10 metrin etäisyydellä keilaimesta 6,3 millimetriä. Tällä pistetiheydellä keilauksen ajanmenekki on 3 minuuttia ja 22 sekuntia. Vastaavasti etäisyysmittauksen tarkkuus on 25 metrin etäisyydellä keilaimesta ± 2 millimetriä. Yksittäisen keilauksen tiedostokoko on las-muotoon muutettuna noin 800 megabittia. (Leica Geosystems AG 2009)



Kuva 2.3. Tutkimuksessa käytetty maastolaserkeilain.

2.3.2 Koepuiden paikantaminen ja merkintä

Koepuut paikannettiin maastosta hyödyntäen katupuurekisteristä saatuja puiden sijaintitietoja. Ennen maastomittausten tekoa sijaintitiedon avulla luotiin koepuita varten lähestymiskartat, joilla voitiin yksilöidä oikea puu maastosta. Puun oikeellisuus varmistettiin käyttäen käsikäyttöistä Garminin 60cs -maastopaikanninta (Garmin Ltd. 2002). Oikean koepuun löydyttyä siihen merkittiin rinnankorkeutta vastaavasti korkean intensiteettiarvon merkkilappu tai merkkinauha (kuva 2.4). Merkinnän tarkoituksena oli helpottaa rinnankorkeuden määrittämistä pistepilvien jatkokäsittelyssä. Merkintä asetettiin siten, että sen yläreuna kuvasi rinnankorkeutta.



Kuva 2.4. Vasemmalla rinnankorkeutta lehdelliseen aikaan kuvaava n. 3x5 cm paperilappu. Oikealla rinnankorkeutta lehdettömän ajan keilauksissa kuvaava 5 cm leveä kangasnauha.

2.3.3 Koepuista mitatut tunnuksot

Koepuista mitatut tunnuksot on esitetty taulukossa 2.6. Koepuiden mittauksot pyrittiin toteuttamaan mahdollisimman tuulettomalla säällä, etteivät puiden oksat liikkuisi keilausta tehtäessä. Aikaisemman tutkimustiedon perusteella on todettu, että yli 5 m/s keskimääräiset tuulennopeudet voivat aiheuttaa pistepilviin vääristymiä puun liikkuessa keilauksen aikana (Seidel ym. 2012). Keilauksia ei myöskään tehty vesi- tai lumisateella, koska keilaimen vesitiiviyydestä ei ollut varmuutta. Kosteiden olosuhteiden, kuten vesisateen tai sumun on lisäksi havaittu lisäävän pistepilviin aiheutuvaa vääristymää sironnan lisääntyessä ja vaikuttavan myös laserkeilattavan pinnan heijastusominaisuuksiin aineiston laatua huonontavasti (Wilkes ym. 2017).

Keilauksia edeltävästi koepuun pituudet mitattiin 10 cm tarkkuudella Vertexiä (Haglöf Sweden AB, Långsele, Sweden) käyttäen (taulukko 2.6). Jokaisesta puusta otettiin vähintään kolme kappaletta pituushavaintoja ja näistä saatu keskiarvo kirjattiin puun pituudeksi. Pituustiedon avulla määritettiin laserkeilauksia varten keilausetaisyys. Keilausetai-

syys mitattiin ja varmistettiin jokaisen keilauksen kohdalla senttimetrin tarkkuudella Vextexin etäisyysmittaustoimintoa käyttäen. Jokaisesta koepuusta kirjattiin ylös mitatut pituudet, sekä mitatut etäisyydet.

Koepuista mitattiin ristiläpimitta rinnankorkeudelta millimetrin tarkkuudella 55 cm mittasaksia käyttäen (taulukko 2.6). Ensimmäinen läpimitta otettiin kohtisuoraan suhteessa ensimmäiseen keilaukseen. Toinen läpimitta mitattiin 90 asteen kulmassa suhteessa ensimmäiseen läpimittaan. Ennen maastomittauksia oli tiedossa, että jotkut koepuista todennäköisesti ovat läpimitaltaan niin suuria, että mittasaksilla ei kyetä läpimittoja mittaamaan. Tämän vuoksi kaikista koepuista mitattiin ympärysmitta rinnankorkeudelta rullamittaa käyttämällä. Puun ympärysmitta voidaan mittausten jälkeen muuntaa läpimitaksi ympyrän geometrian avulla.

Lopullinen koepuuaineisto sisälsi 9 kpl koepuita, jotka olivat läpimitaltaan niin suuria, ettei ristiläpimittaa ollut mahdollista mitata maastossa. Tästä syystä tutkimuksessa päätettiin käyttää varsinaisena läpimittana ympärysmittasta johdettua läpimittaa, koska se voitiin mitata jokaisesta koepuusta yhtenäisellä tavalla. Ristiläpimitat mitattiin ja kirjattiin kuitenkin ylös maastossa niin monesta koepuusta, kuin on vain mahdollista.

Taulukko 2.6. Koepuista maastossa mitatut tunnuksat.

<i>Tunnus</i>	<i>Yksikkö</i>	<i>Kuvaus</i>
<i>Maastolaserkeilaus</i>		<i>2 keilausta/ koepuu</i>
<i>Ristiläpimitta</i>	<i>millimetri</i>	<i>Mittasaksilla 2 mittausta/koepuu</i>
<i>Ympärysmitta</i>	<i>millimetri</i>	<i>Rullamitta</i>
<i>Pituus</i>	<i>desimetri</i>	<i>Vextex (keskiarvo 3 mittauksesta)</i>
<i>Keilausetäisyys</i>	<i>senttimetri</i>	<i>Vertex (etäisyys keilaimen ja koepuun välillä)</i>

Koepuiden keilaukset suoritettiin maastossa vastakkaisilta puolilta puuta. Koepuiden keilausetäisyydet määritettiin jokaisen koepuun kohdalla erikseen. Keilausetäisyytenä käytettiin etäisyyttä, joka vastaa 50 % keilattavan puun pituudesta. Keilausetäisyyden määrittämisessä hyödynnettiin Saarisen ym. (2017) tutkimustuloksia, joiden mukaan optimaalisimpana keilausetäisyytenä voidaan pitää enintään 50 % puun pituudesta. Koepuiden keilausten yhteydessä keilausetäisyydet dokumentoitiin ja ne on esitetty taulukossa 2.7.

Koepuiden keilaukset pyrittiin toteuttamaan siten, että katvealueita aiheuttavia esteitä ei jää keilaimen ja koepuun väliin. Koepuuta vastaava ensimmäinen keilaus pyrittiin tekemään etäisyydeltä, joka vastaa 50 % puun pituudesta. Koepuuta vastaavan toisen keilaukset osalta keilausetäisyydessä sallittiin enemmän hajontaa, mikäli infrastruktuurin ja ympäristön aiheuttamat katvealueet eivät muuten olleet hallittavissa.

Keskimääräisesti lehdettömään aikaan tehtyjen keilausten keilausetäisyys noudatti tavoiteltua 50 % etäisyyttä koepuun pituudesta ensimmäisen ja toisen keilauksen tapauksessa (taulukko 2.7). Lehdelliseen aikaan sitä vastoin katvealueita syntyi puun lehtien vuoksi enemmän ja toisena tehtävän keilauksen etäisyyksiin aiheutui siitä syystä enemmän hajontaa, kuin lehdettömän ajankohdan keilausten yhteydessä. Tämä on nähtävissä lehdelliseen aikaan tehtyjen keilausten suurempana suhteellisena etäisyytenä jälkimmäisten keilausten tapauksessa (taulukko 2.7). Lehdelliseen aikaan tehtyjen jälkimmäisten keilausten etäisyys oli keskimäärin noin 72 % koepuun pituudesta. Enimmillään se oli 141 % koepuun pituudesta.

Taulukko 2.7. Suhteellinen keilausetäisyys lehdettömään ja lehdelliseen aikaan. Suhteet ovat laskettu vertaamalla keilausetäisyyttä mitattavan puun pituuteen.

Lehdetön	Keilaus 1	Keilaus 2
<i>Min %</i>	39 %	37 %
<i>Max %</i>	92 %	75 %
<i>Mediaani %</i>	50 %	51 %
<i>Keskiarvo %</i>	51 %	51 %
Lehdellinen	Keilaus 1	Keilaus 2
<i>Min %</i>	37 %	37 %
<i>Max %</i>	80 %	141 %
<i>Mediaani %</i>	53 %	70 %
<i>Keskiarvo %</i>	54 %	72 %

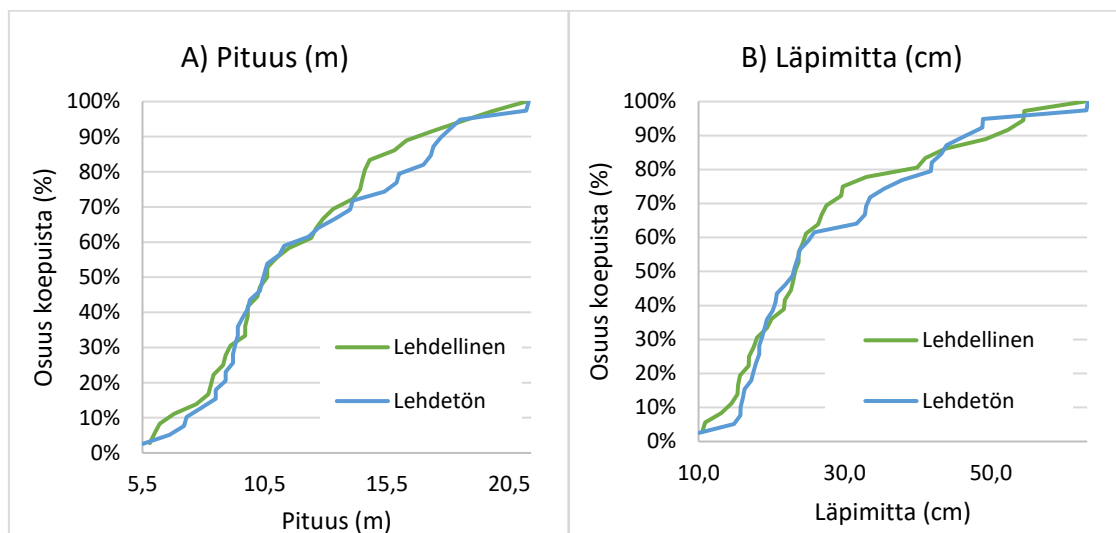
2.3.4 Aineiston rakenne

Taulukossa 2.8 on yhteenveto maastomittauksen tuloksista läpimitan ja pituuden suhteen. Suurimmat puut olivat läpimitaltaan yli 60 cm ja pienimmät hieman yli 10 cm. Keskiläpimitta ja mediaaniläpimitta olivat lehdellisen ja lehdettömän ajan koepuiden osalta suuruudeltaan hyvin samat. Pituuden osalta kummankin ajankohdan keilausten koepuista suurimmat olivat noin 21 metrin pituisia ja lyhimät puut hieman alle 6 metrisiä.

Taulukko 2.8. Maastossa koepuista mitatut läpimitat ja pituudet.

<i>Lpm cm</i>	<i>Maastossa mitattu</i>	
	<i>Lehdetön</i>	<i>Lehdellinen</i>
<i>Min</i>	10,1	10,5
<i>Max</i>	63,3	62,8
<i>Mediaani</i>	23,2	23,5
<i>Keskiarvo</i>	28,4	27,5
<i>Pituus m</i>	<i>Lehdetön</i>	<i>Lehdellinen</i>
<i>Min</i>	5,5	5,8
<i>Max</i>	21,3	21,2
<i>Mediaani</i>	10,5	10,6
<i>Keskiarvo</i>	12,1	11,6

Kuvassa 2.5 on havainnollistettu aineiston rakennetta pituuden ja rinnankorkeusläpimitan suhteen aineiston sisällä. Aineistossa olevien koepuiden pituudet ja läpimitat kehittyvät melko tasaisesti läpi koko aineiston, eikä mikään yksittäinen läpimitta-, tai pituusluokka ole yliedustettuna. Tämä sama trendi on nähtävissä, kun vertaillaan lehdellisen- ja lehdettömän ajan mittaustuloksia.

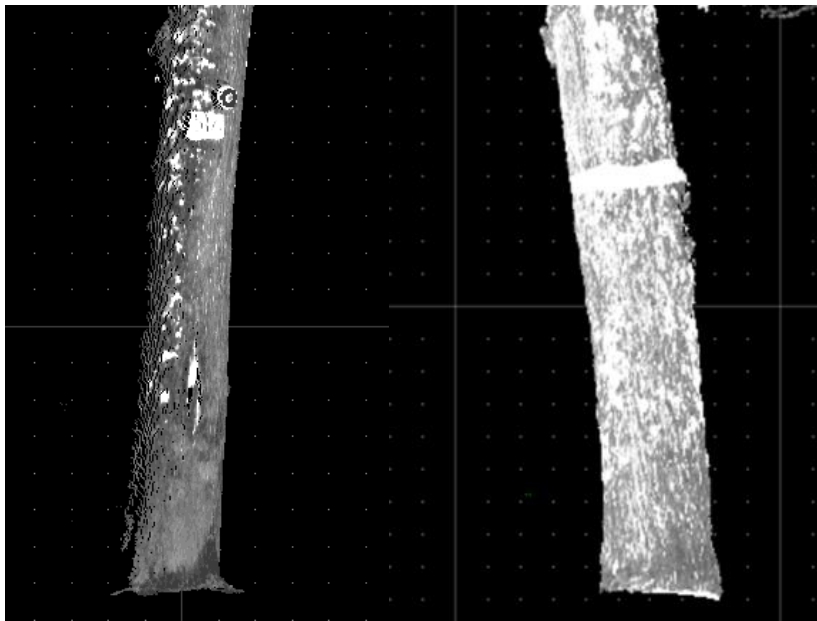


Kuva 2.5. Maastossa mitattujen koepuiden (A) pituudet ja (B) läpimitat suhteessa koepuuaineiston suhteelliseen kokoon.

2.4 Pistepilvien käsittely ja runkojen erottaminen

Leican HDS6100 laserkeilain tallentaa keilauksien yhteydessä pistepilvet ZFS-tiedostojärjestelmään (Zettabyte File System). ZSF-tiedostojärjestelmään tallennettuna yhden keilauksen koko jää tyypillisesti hieman alle 200 megatavun. Tiedostot muunnettiin LAS-muotoon ja samalla pistepilville tehtiin suodatuksia, joissa poistettiin vääristyneitä pikseleitä sekä pistepilveen syntynyttä melua. Muuntaminen ja suodattaminen tehtiin Z + F LaserControl (Zoller & Fröhlich GmbH, Wangen im Allgäu, Germany) ohjelmistolla ja hyödyntäen oletussuodatusasetuksia. LAS-tiedostomuodossa yksittäiset keilaukset olivat tyypillisesti kooltaan noin 800 megatavua. Koepuiden etsintä ja erottaminen pistepilvestä tehtiin TerraScan-ohjelmistolla (Terrasolid, Helsinki).

Koepuut etsittiin pistepilvistä manuaalisesti. Etsinnässä hyödynnettiin maastossa koepuiden rinnankorkeuden laputtamiseen käytettyjä merkintöjä, jotka olivat erotettavissa koepuiden pistepilvistä (kuva 2.6). Lisäksi koepuun todentamisessa käytettiin maastossa mitattua keilaimen ja koepuun välistä etäisyyttä. Intensiteettikuvan ja etäisyyden avulla pystyttiin todentamaan jokaisen keilatun koepuun oikeellisuus.



Kuva 2.6. Vasemmalla intensiteettikuva lehdellisen ajan keilauksesta ja oikealla lehdettömän ajan keilauksesta.

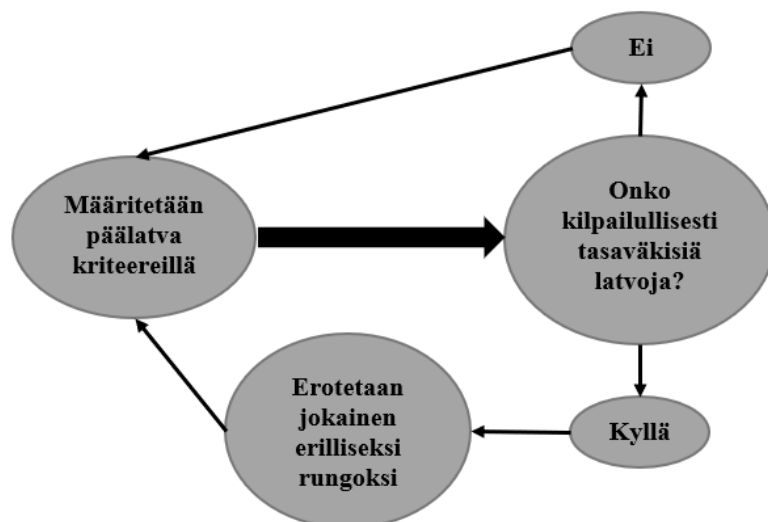
2.4.1 Kriteerit rungon ja runkojen erottamiseen pistepilvestä

Lehmukset poikkeavat tyypillisesti kasvutavaltaan havupuista, sillä ne saattavat haaroittua voimakkaasti ja niillä on usein poikaoksia. Haaroittumista lisää luonnollisesti puiden ympärillä oleva kasvutila ja auringon valon runsas määrä. Runkokäyrän mittaamisen edellytyksenä on pystyä rajaamaan pistepilvi siten, että se sisältää vain rungolta syntyneet koordinaattipisteet latvaan saakka. Lehmuksen tapauksessa mahdollisia latvoja saattaa kuitenkin olla useita. Tämän vuoksi tutkimuksessa jouduttiin pohtimaan toimintatapaa tilanteessa, jossa pistepilvestä on havaittavissa kilpailullisesti useampi yhtä vahva latva. Jos koepuussa havaittiin pistepilven perusteella useampi tasaväkinen latva, niin ne päädyttiin erottamaan erikseen. Käsittelemällä haarat erikseen, saatiin minimoitua systemaattista tilavuusvirheen todennäköisyyttä haaraisten puiden tapauksessa.

Kuvassa 2.7 on esitetty prosessin kulku jokaisen koepuun kohdalla. Ensimmäisessä vaiheessa määritetään pistepilvestä puun päälatva. Päälatvaksi nimitetään tässä yhteydessä seuraavan kriteeristön osoittamaa osaa puusta:

1. Päälatva on se osa runkoa, joka on läpimitaltaan suurin ja yhtenäisin osa runkoa koko puun pituudelta.
2. Päälatva on se osa, joka muodostaa puun korkeimman pisteen.
3. Päälatva on se osa runkoa, joka kasvaa mahdollisimman kohtisuoraan suhteessa maahan (90 astetta).

Kriteeristössä esitetyt kolme kriteeriä eivät ole yhtä arvokkaita toisiinsa nähden. Sisäinen priorisointi tehdään siten, että ensimmäiselle kriteerille annetaan suurempi painoarvo, kuin toiselle kriteerille ja vastaavasti toinen kriteeri saa suuremman painoarvon kuin kolmas kriteeri. Käytännössä tämä näkyy siten, että päälatvan ei tarvitse muodostaa korkeinta osaa puusta, jos se on selvästi vahvin ja yhtenäisin osa puuta. Vastaavasti päälatvan ei tarvitse kasvaa kohtisuoraan suhteessa maan pintaan, jos se muodostaa korkeimmalle yltävän osan puusta, tai on muuten yhtenäisin ja vahvin osa puuta.

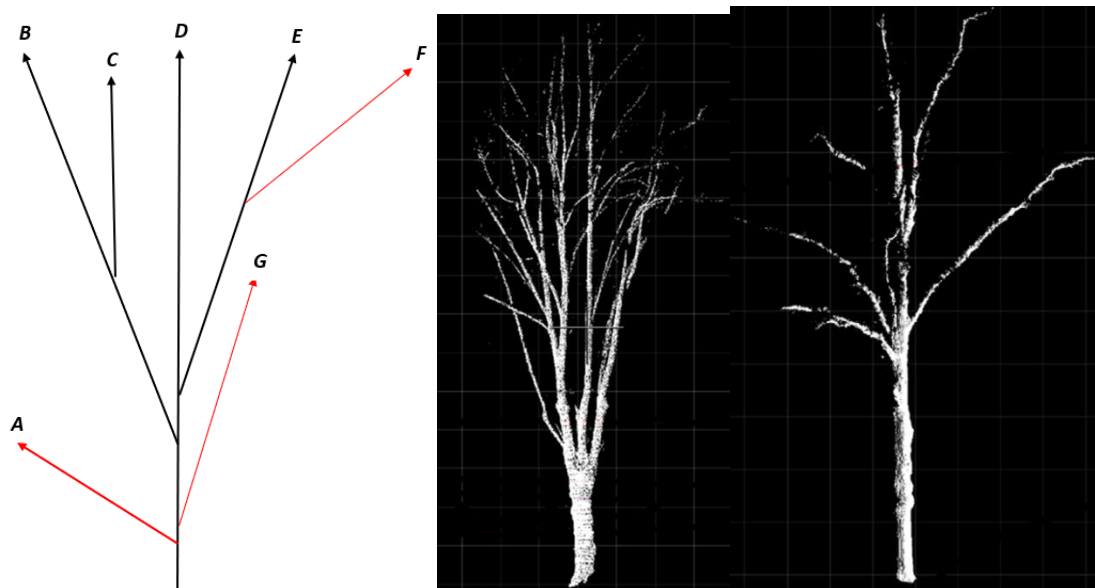


Kuva 2.7. Prosessi rungon erottamiseen pistepilvestä.

Päälatvan määrittämisen jälkeen tarkastellaan mahdollisten kilpailevien latvojen olemassaoloa suhteessa päälatvaan. Mikäli koepuulla havaitaan olevan kilpailullisesti tasaväkisiä latvoja, niin jokainen latva erotettiin erillisenä runkonaan. Tasaväkisten latvojen tunnistamisessa käytettiin seuraavia valintaperiaatteita:

1. Kilpailullisen latvan ja päälatvan läpimitat ovat haarautumiskohdassa lähes samat.
2. Kilpailullinen latva yltää samalle, tai lähes samalle korkeudelle, kuin päälatva.
3. Kilpailullisen latvan ja päälatvan välinen kulma on haarautumiskohdassa alle 45 astetta.

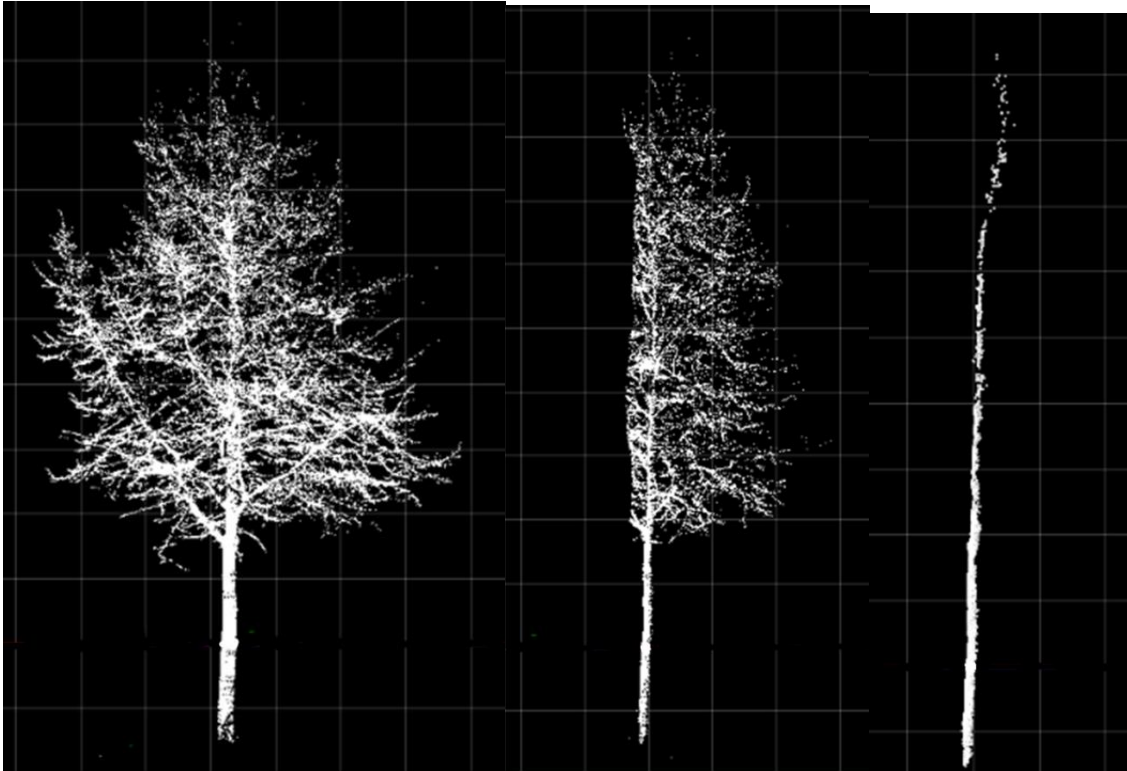
Valintaperiaatteiden toimintaa käytännössä pyritään havainnollistamaan kuvalla 2.8. Toisin kuin aikaisemmin esitetyissä päälatvan erottamiseen käytetyissä kriteereissä, kilpailevien latvojen tunnistamisessa kaikkien valintaperiaatteiden tulee täytyä. Kuvassa päälatvaa ilmentää musta nuoli D. Mustalla värillä esitetyt nuolet B, C ja E kuvaavat puun haaroja, jotka täyttävät valintakriteerit ja erotetaan pistepilvestä erillisenä latvanaan. Punaiset nuolet ovat haaroja, joita ei valita kriteerien perusteella erotettavaksi erillisenä latvanaan.



Kuva 2.8. Kilpailevien latvojen tunnistamiseen käytetyt periaatteet. Mustalla värillä olevat haarat (B, C, D, E) tulkittiin kilpailullisiksi latvoiksi. Punaiset nuolet (A, F, G) kuvaavat latvoja, jotka tulkittiin oksiksi. Oikealla havainnollistettu haaraisten puiden pistepilviä.

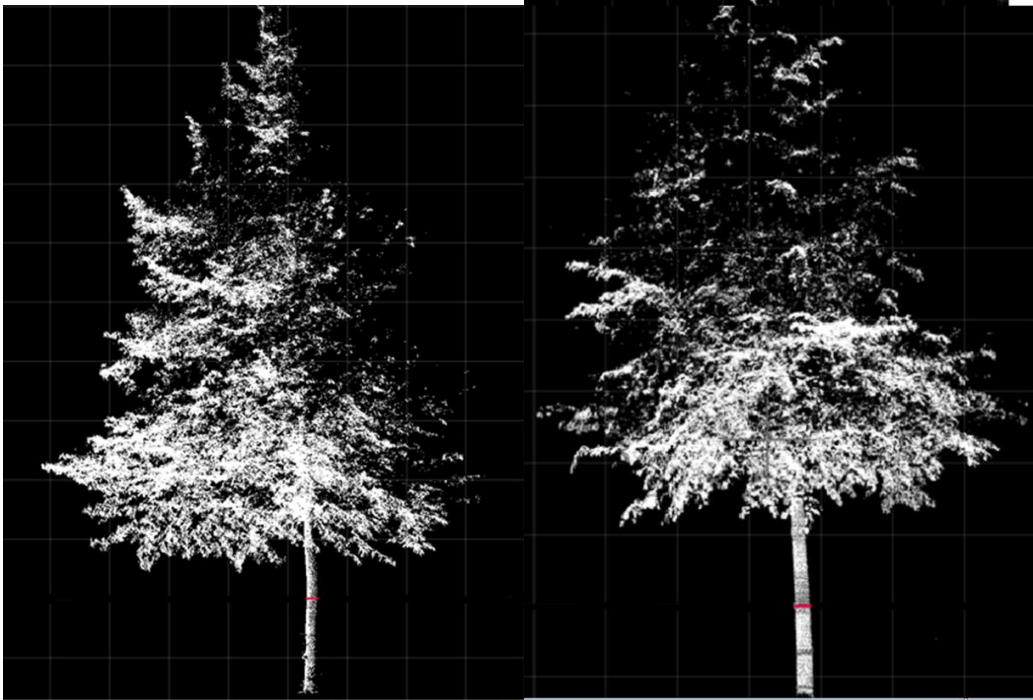
2.4.2 Runkojen erottaminen

Rungot erotettiin pistepilvestä manuaalisesti luokittelemalla koepuun pistepilvi rungosta lähtöisin oleviin pisteisiin ja oksistosta lähtöisiin pisteisiin. Luokittelu tehtiin horisontaalisesti suhteessa koepuuhun, jolloin voitiin poistaa pistepilvistä oksat mahdollisimman tehokkaasti ja rungon myötäisesti. Työvaiheena rungon erottaminen vaatii subjektiivista harkintaa, sillä kaikissa tilanteissa ei ollut itsestään selvää, mitkä pisteet ovat lähtöisin koepuun rungolta ja mitkä oksistosta. Rungon erottamisen vaiheita on kuvattu kuvassa 2.9.

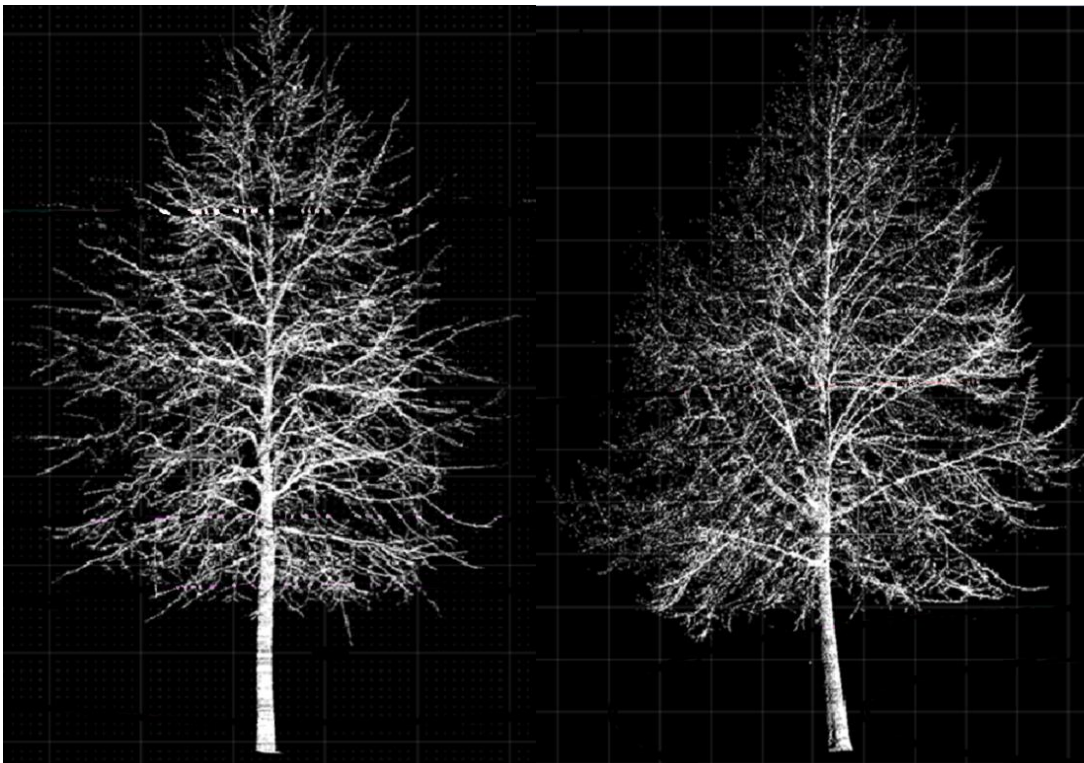


Kuva 2.9. Rungon erottaminen vaiheittain pistepilvestä.

Keilausajankohdalla havaittiin myös olevan suurta vaikutusta siihen, miten hyvin rungolta syntyneet pisteet ovat erotettavissa pistepilvessä. Eri ajankohdan pistepilviä tarkastelemalla voidaan nähdä selviä eroja lehdellisen ja lehdettömän keilauksen välillä (kuvat 2.10 ja 2.11). Lehdettömään aikaan pistepilvi on huomattavasti lehdellistä aikaa yksityiskohtaisempi ja jopa pienet oksat erottuvat pistepilvessä hyvin. Vastaavasti lehdellisen ajan pistepilvessä oksiston yksityiskohtia ei ole samaan tapaan nähtävissä. Erot pistepilvissä johtuvat kesäaikaan lehtien muodostamista katvealueista, joita lehdettömän ajan keilauksissa ei ole. Lehvästön vaikutus on silmämääräisesti tarkasteltuna selvästi havaittavissa.



Kuvat 2.10. Esimerkkipistepilvet lehdelliseen aikaan.



Kuvat 2.11. Esimerkkipistepilvet lehdettömään aikaan.

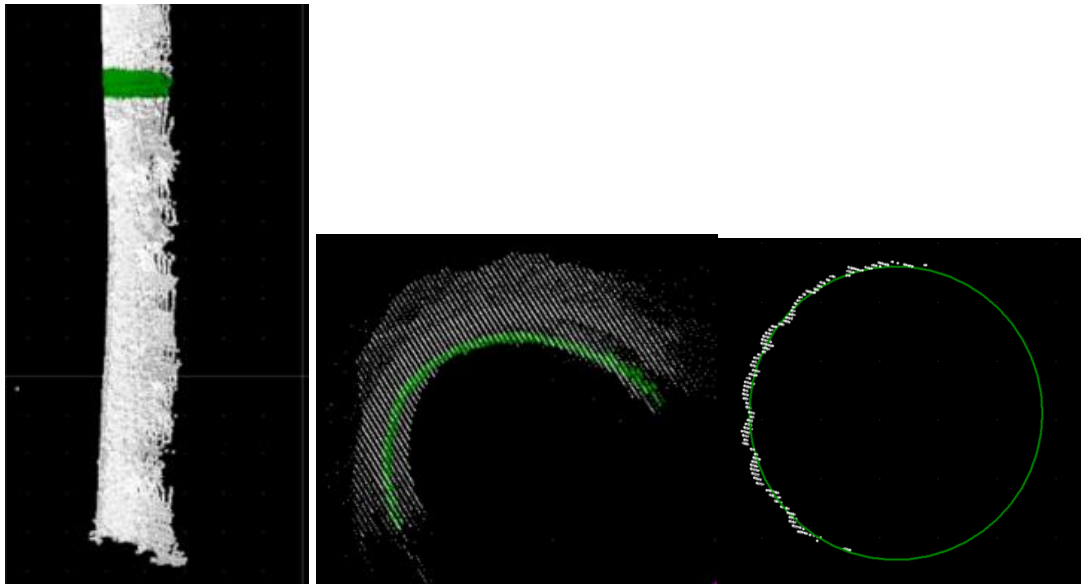
Lehdellisen ajan keilausten suhteen koepuiden pistepilvistä erotettiin ainoastaan yksi runko keilausta kohti. Erillisiä haaroja pystytty niiden heikon erotettavuuden vuoksi luokittelemaan erilleen. Kaikkien kesäaikaan keilattujen koepuiden osalta ei voitu täysin varmistua siitä, että erotetut pisteet olivat todellisuudessa syntyneet puun rungolta.

Lehdettömän ajan keilausten suhteen lopputulos oli kuitenkin parempi. Jokaisen talviaikaan keilatun koepuun tapauksessa saatiin erotettua varmuudella puun päälatva ja sen oikeellisuus pystyttiin todentamaan. Osa talviaikaan keilatuista koepuista oli myös selkeästi haaraisia ja niistä tunnistettiin päälatvan lisäksi kilpailevia latvoja. Koepuita, joista pystyttiin erottamaan päälatvan ohella myös kilpailevia haaroja, oli lukumääräisesti 13 kpl. Pääasiassa kilpailevia latvoja oli lukumääräisesti vain yksi päälatvan ohella, mutta enimmillään pistepilvestä erotettiin päälatvan ohella 10 kpl tasaväkisiä latvoja.

2.5 Läpimittojen mittaaminen pistepilvestä runkokäyräalgoritmilla

Tässä tutkimuksessa käytettyä runkokäyräalgoritmia on aikaisemmin käytetty esimerkiksi Saarisen ym. (2017) tutkimuksessa. Toimintaperiaatteeltaan algoritmi on vastaavanlainen, kuin esimerkiksi Litkey ym. (2008) ja Maas ym. (2008) tutkimuksissa käytetyt runkokäyräalgoritmit. Algoritmin käyttöliittymänä on R-ohjelma (R Development Core Team 2011). Algoritmiin syötetään koepuun pistepilvestä erotetut rungon pisteet sekä pistepilvestä erotettu rinnankorkeutta vastaava z-koordinaatin lukuarvo. Pistepilvi on normaalisti tallennettu paikalliseen koordinaatistoon, jossa keilaimen sijainti muodostaa koordinaatiston nollakohdan x, y, ja z-koordinaattien suhteen. Runkokäyräalgoritmi tarvitsee tiedon, jolla rinnankorkeus voidaan linkittää paikalliseen koordinaatistoon, että algoritmin läpimittoja vasten palauttavat korkeustiedot vastaavat todellisuutta.

Algoritmin toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 2.12. Algoritmi käy koko rungon läpi ja tekee tasavälein rungon pistepilveen määrätyn suuruisia leikkauksia, joita on havainnollistettu vihreällä värillä. Tämän jälkeen algoritmi projisoi 3D-kuvan kaksiulotteiseen tasoon ja tekee siihen ympyräsovituksen (kts. Bienert ym. 2007). Ympyräsovitusta tehdään pienimmän neliösumman menetelmällä. Varsinaiset algoritmin palauttavat läpimittatiedot perustuvat ympyräsovituksessa käytetyn ympyrän halkaisijaan. Jos korkeusvälillä ei ole riittävästi pisteitä ympyräsovituksen tekemiseen, niin algoritmi palauttaa NA-arvon kyseiselle korkeudelle.



Kuva 2.12. Runkokäyräalgoritmin toimintaperiaate vasemmalta oikealle: Algoritmi tekee rungon pistepilveen leikkauksen, muuntaa sen kaksiulotteiseen tasoon ja tekee ympyräsovituksen.

Runkokäyräalgoritmissa on kolme parametria, joita voidaan algoritmin toiminnan suhteen muokata:

1. Läpimittojen tallennusväli (cm)
2. Pistemäärä ympyräsovituksen pohjaksi (kpl)
3. Korkeusväli, jolle sovitus tehdään (cm)

Läpimittojen tallennusvälillä tarkoitetaan etäisyyttä, jonka välein algoritmi palauttaa läpimitan mittaustestimaatin rungolta. Esimerkiksi, jos läpimitat palautetaan 2 cm välein, niin 20 metrin pituisesta puusta saadaan 1000 kpl läpimittahavaintoa, jos taas 10 cm välein, niin mittahavaintoja saadaan 200 kpl. Läpimittojen suuren lukumäärän ei kuitenkaan yksiselitteisesti havaittu visuaalisella tarkastelulla lisäävän estimoitujen läpimittojen laatua. Usean koepuun tapauksessa mitä pienempää läpimittojen tallennusväliä käytettiin, niin sitä suurempaa hajontaa läpimittaennusteisiin syntyi. Tästä syystä tutkimuksessa päätettiin käyttämään läpimittojen palautusvälinä 10 cm, joka takasi riittävän määrän läpimittoja tutkimuksen jatkoon kannalta.

Pistemäärällä ympyräsovituksen pohjaksi tarkoitetaan pistemäärää, jonka algoritmi vähintään edellyttää, jotta se tekee ympyräsovituksen ja palauttaa sitä vastaavan läpimittaestimaatin rungolta. Teoriassa ympyrän sovittamiseen kaksiulotteisessa tasossa riittää

kaksi koordinaattipistettä. Läpimittaennusteen oikeellisuutta ja realistisuutta voidaan kuitenkin parantaa lisäämällä ympyräsovituksen pohjaksi enemmän koordinaattipisteitä. Tällöin läpimittaennusteiden todenmukaisuus lisääntyy, kun ympyräsovitusta keskiarvoistuu eivätkä siihen vaikuta niin voimakkaasti yksittäiset poikkeavat pisteet. Estimoitujen läpimittaennusteiden lukumäärä kuitenkin vähenee, sillä algoritmi vaatii suuremman pistetiheyden läpimittaennusteen tuottamiseksi.

Korkeusväli, jolle sovitusta tehdään tarkoittaa rungosta kolmiulotteisesti pituussuunnassa tehtyä leikkausta, joka projisoidaan ympyräsovitusta varten kaksiulotteiseen tasoon. Algoritmi tekee projisoituun leikkaukseen ympyräsovituksen. Käytettäessä pientä korkeusväliä, saadaan algoritmi toimimaan joustavasti ja reagoimaan rungon läpimitassa paikallisesti tapahtuviin muutoksiin. Pieni korkeusväli ei kuitenkaan välttämättä aina takaa riittävää määrää koordinaattipisteitä ympyräsovituksen pohjaksi, mikä vähentää läpimittaestimaattien määrää. Suurempi korkeusväli lisää todennäköisyyttä läpimittaestimaatin saatavuuteen, mutta toisaalta voi läpimittaestimaattien keskiarvoistumista ja siten vaimentaa rungon läpimitoissa paikallisella tasolla tapahtuvaa vaihtelua.

Runkokäyräalgoritmin parametrien valinta tehtiin käyttäen pientä neljän koepuun testiaineistoa. Parametreista ensimmäinen, eli läpimittojen tallennusväli vakioitiin ennen testausta 10 cm suuruiseksi. Ympyräsovituksen pohjan pistemäärää testattiin neljällä eri arvolla, sekä ympyräsovituksen korkeusväliä kolmella arvolla (taulukko 2.9). Testaukset tehtiin ristiin siten, että jokaisen koepuun kohdalla kokeiltiin 24 kpl eri parametriyhdistelmää. Tavoitteena optimoinnissa oli maksimoida algoritmin rungolta palauttamien läpimittaestimaattien määrää suhteessa rungon pituuden suhteen mahdolliseen läpimittojen määrään nähden. Lisäksi pyrittiin runkokäyrien visuaalisella tarkastelulla minimoimaan algoritmin tuottamien selkeästi poikkeavien havaintojen määrää läpimittaennusteissa.

Taulukko 2.9. Runkokäyräalgoritmin parametritestauksessa läpikäydyt parametrien arvot.

<i>Parametrit</i>	<i>Arvot</i>
<i>Läpimittojen intervalli (cm)</i>	<i>10</i>
<i>Pistemäärä ympyräsovituksen pohjaksi (kpl)</i>	<i>7, 15, 30, 60</i>
<i>Korkeusväli, jolle sovitusta tehdään (cm)</i>	<i>2, 5, 10</i>

Taulukkoon 2.10 on laskettu keskiarvot algoritmin tuottamien läpimittojen määrän suhteesta teoreettiseen maksimimäärään kaikkien testattujen neljän koepuun suhteen eri parametrijohdistelmilla.

Tuloksista voidaan nähdä, että käytettäessä sovituksen korkeusvälinä 10 senttimetriä ja ympyräsovituksen pistemääränä 7 pistettä, niin algoritmi antaa näillä arvoilla eniten läpimittahavaintoja (taulukko 2.10). Mitä suuremmalta korkeusväliltä leikkaus rungolta tehdään, niin sitä todennäköisemmin saadaan riittävä määrä pisteitä ympyräsovituksen pohjaksi. Kääntöpuolena kuitenkin saattaa olla läpimittojen liiallinen keskiarvoistuminen, jos leikkausvälinä käytetään liian suurta korkeusväliä. Testiaineiston yhteydessä ei kuitenkaan havaittu visuaalisella tarkastelulla keskiarvoistumista vielä 10 cm leikkausta käytettäessä.

Ympyräsovituksen pistemäärä vaikuttaa testiaineiston perusteella päinvastaisesti suhteessa leikkauksen suuruuteen, jolle ympyräsovitus tehdään (taulukko 2.10). Mitä pienempää pistemäärää käytetään, niin sitä enemmän läpimittoja saadaan. Alempi pistemäärä kuitenkin voi aiheuttaa läpimittaestimaatteihin enemmän hajontaa ja harhaisuutta. Parametrien testauksen yhteydessä havaittiin, että käytettäessä 7 kpl pisteitä ympyräsovituksen pohjaksi harhaisuutta ja poikkeavia havaintoja oli suhteessa enemmän havaittavissa, kuin suuremmilla pistemäärillä. Poikkeavat havainnot ilmenivät yleisimmin puun latvassa, jossa pistetiheys on alhaisin. Poikkeavien havaintojen määrä kuitenkin vähentyi runsaasti siirryttäessä 7 kpl pisteestä 15 pisteeseen. Eroja 15, 30, ja 60 pisteen tuottamien poikkeavien havaintojen määrällä suhteessa toisiinsa ei enää merkittävässä määrin ollut.

Taulukko 2.10. Parametritestauksen tulokset. Esitetyt suhdeluvut kuvaavat algoritmin tuottamien läpimittaennusteiden määrän suhdetta teoreettiseen maksimimäärään.

<i>Pistemäärä ympyräsovituksen</i>	<i>Korkeusväli, jolle sovitus tehdään</i>		
<i>pohjaksi</i>	<i>2 cm</i>	<i>5 cm</i>	<i>10 cm</i>
<i>n=7</i>	75 %	83 %	86 %
<i>n=15</i>	66 %	78 %	83 %
<i>n=30</i>	56 %	69 %	78 %
<i>n=60</i>	44 %	60 %	68 %

Runkokäyräalgoritmin parametrivalinnan yhteydessä päädyttiin valitsemaan taulukossa 2.11 esitetyt parametrien arvot. Näiden parametrien havaittiin tuottavan testiaineistolla

mahdollisimman paljon läpimittaennusteita rungolta, mutta samaan aikaan mahdollisimman vähän selkeästi poikkeavia havaintoja. Näitä parametreja käyttämällä estimoitiiin koko koepuuaineiston runkoläpimitat.

Taulukko 2.11. Parametritestauksen perusteella valitut runkokäyräalgoritmin parametrit.

Valitut parametrit	Arvot
<i>Läpimittojen intervalli (cm)</i>	<i>10</i>
<i>Pistemäärä ympyräsovituksen pohjaksi (kpl)</i>	<i>15</i>
<i>Korkeusväli, jolle sovitus tehdään (cm)</i>	<i>10</i>

2.6 Lopulliset runkokäyrät ja puukohtaisten tunnusten mittaaminen

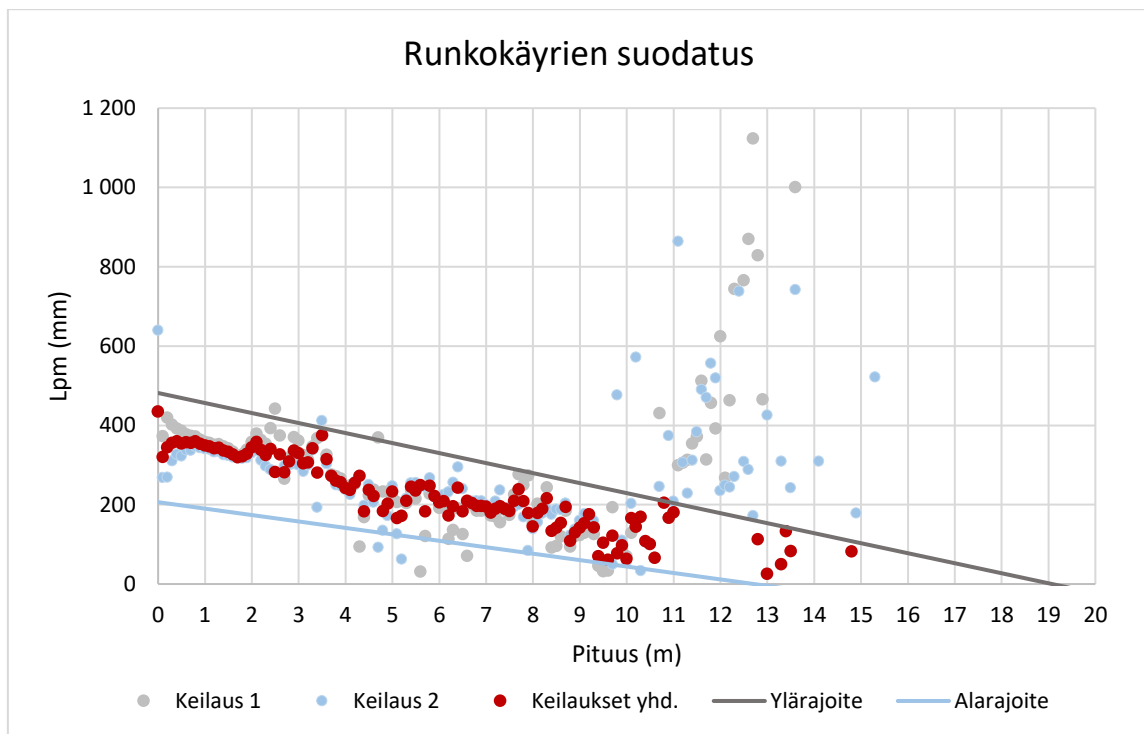
2.6.1 Runkokäyrien suodatus ja interpolointi

Runkokäyrien suodatus tehtiin käyttäen lineaarisia ylä- ja alarajaa mallintavia rajoitteita, joiden avulla tehtiin raja- ja lopullisiin runkokäyriin sisällytettävien läpimittahavaintojen ja poikkeavina havaintoina poistettavien läpimittojen välillä (kuva 2.13). Vaikka testiaineiston avulla pyrittiin edellisessä työvaiheessa optimoimaan käytettävät runkokäyräalgoritmin parametrit siten, että epäloogiset läpimittahavainnot saataisiin minimoitua, niin siitä huolimatta selkeästi poikkeavia havaintoja syntyi jonkin verran. Tästä syystä rungon läpimittaestimaatteja suodatettiin ennen interpolointia, jotta poikkeavat havainnot eivät vääristäisi lopullisia runkokäyriä.

Suodatuksessa käytettävien lineaaristen rajoitteiden pohjana käytettiin maastossa mitattua ympärysmittasta johdettua läpimittaa sekä maastossa mitattua puun pituutta. Näiden kahden pisteen avulla voitiin luoda lineaarinen rajoite, joka kulkee kummankin tunnetun pisteen kautta (kuva 2.13). Kuvaajasta saatiin muodostettua erilliset kuvaajat alarajaa ja ylärajaa varten, kun maastossa mitatuille havainnoille sallittiin prosentuaalinen vaihteluväli läpimitan ja pituuden suhteen. Läpimitan prosentuaalisena vaihteluvälinä käytettiin ± 40 % ja pituuden vaihteluvälinä ± 20 %. Soveltuvat prosentuaaliset raja-arvot etsittiin visuaalisen tarkastelun avulla käymällä läpi lähes kaikki aineiston puut. Tällä voitiin varmistua siitä, että rungolta tulleita läpimittoja ei poikkeavina havaintoina epähuomiossa

poistettaisi. Menetelmän etuna oli sen helppo yleistettävyyys kaikille koepuille ja mahdollisuus käsitellä jokainen koepuu samojen suhteellisten ala- ja ylärajoitteiden avulla, koska kaikista koepuista oli olemassa maastossa mitattu pituus ja rinnankorkeusläpimitta.

Runkokäyrien suodatuksen ohella kahdesta erillisestä keilauksesta saaduista läpimitan estimaateista yhdistettiin yksi kattava runkokäyrä. Yhdistäminen tehtiin laskemalla aritmeettinen keskiarvo kahden eri runkokäyrän jokaista korkeutta vastaavista läpimittaestimaateista (kuva 2.13). Jos korkeutta vastaavia läpimittaestimaatteja saatiin vain toisesta keilauksesta, niin nämä läpimitat huomioitiin yhdistetyssä runkokäyrässä suoraan. Jos taas korkeutta vastaavia läpimittoja ei saatu kummastakaan keilauksesta, niin yhdistetyssä runkokäyrässä tämä huomioitiin jättämällä tätä korkeutta vastaava läpimittaestimaatti tyhjäksi.



Kuva 2.13. Rungon läpimittaestimaattien suodatus ja keilauksien yhdistäminen yhdeksi runkokäyräksi

Koepuuaineiston sisältämät haaraiset puut käsiteltiin tässä kohdin osittain muista poikkeavalla tavalla. Koepuuaineisto sisälsi lukumääräisesti 13 kpl haaraisia koepuita, joissa tulkittiin runkojen erotusvaiheessa olevan päälätvan lisäksi kilpailevia latvoja. Haaraisten puiden tapauksessa muodostettiin keilausta kohden rungon alustavat läpimittaestimaatit

summaamalla jokaista korkeushavaintoa vastaavat haarat yhteen, ikään kuin ne olisivat vain yksi päärunko puussa. Koska läpimittojen summaaminen suoraan ei ole matemaattisesti perusteltavissa, niin tiettyä korkeushavaintoa vastaavat läpimitat muutettiin ensin pohjapinta-alaksi ja laskettiin pinta-alana yhteen (kaava 2.3). Tämän jälkeen pohjapinta-alat (PPA) palautettiin takaisin vastaamaan rungon läpimitta-arvoa (d). Summaamisen jälkeen haaraisten puiden kahden keilauksen läpimittaestimaatit yhdistettiin ja niitä suodatettiin samalla tavalla, kuin ei-haaraisten puiden tapauksessa edellä on kerrottu.

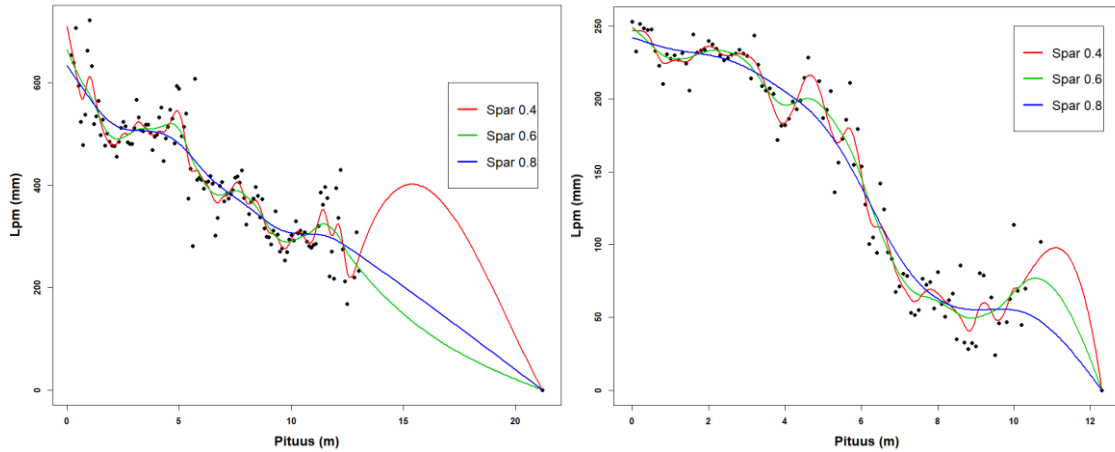
$$PPA = \frac{\pi}{4} * d^2 \quad \longrightarrow \quad d = \sqrt{\frac{4 * PPA}{\pi}} \quad (2.3)$$

Runkoläpimittojen suodattamisen ja yhdistämisen jälkeen suoritettiin interpolointi runkokäyrien tasaamiseksi ja puuttuvien läpimittahavaintojen saamiseksi. Interpolointi tehtiin kuutiospliniin perustuvasti R-ohjelman `smooth.spline` -funktia käyttämällä (R Development Core Team 2011). Interpoloinnin jälkeen läpimitat palautettiin jokaiselta rungolta 5 senttimetrin välein tyveltä latvaan saakka käyttäen `predict`-funktia.

Interpoloinnissa voidaan interpolointikäyrän notkeutta muokata `spar`-tasausparametria muuttamalla välillä 0-1. Erilaisia tasausparametrin arvoja vertailtiin visuaalisesti useamman koepuun tapauksessa ja sopivin arvo etsittiin kokeilemalla (kuva 2.14). Interpoloinnin tasausparametrin suuruuden täytyy olla sellainen, että se takaa riittävän suuren notkeuden, jolloin interpolointikäyrä seuraa riittävän yksityiskohtaisesti koepuun rungon muotoja. Notkeus ei kuitenkaan saa olla liiallinen, ettei interpolointikäyrä reagoi ja seuraa liian tiiviisti yksittäisiä läpimittahavaintoja rungolla. Tällöin tasausparametrin liian suuri notkeus voi aiheuttaa herkästi epäloogisuuksia interpolointituloksiin. Paras interpolointitulokset saavutettiin visuaalisen tarkastelun perusteella käyttämällä tasausparametrin arvona 0,8. Tätä tasausparametria käyttämällä interpoloitiin jokaisen aineistossa olevan koepuun runkokäyrä.

Interpolointikäyrä lisäksi pakotettiin kulkemaan maastossa mitattua pituutta vastaavan pisteen kautta painottamalla sitä erillisen painotusvektorin avulla. Painotusvektorissa

määritettiin puun pituutta vastaavalle pisteelle huomattavasti muita rungon pisteitä suurempi painoarvo, joka sitä kautta varmisti käyrän kulun kyseisen pisteen kautta. Puun pituutta vastaavassa pisteessä interpolointikäyrän tuli antaa läpimitaksi arvo nolla.



Kuva 2.14. Splini-interpoloinnin optimaalista tasausparametria etsittiin visuaalisen tarkastelun kautta. Kuvissa esitetyt tasausparametrit: 0,4 (punainen), 0,6 (vihreä) ja 0,8 (sininen). Lopulliseksi tasausparametrin arvoksi valittiin 0,8.

2.6.2 Puukohtaisten tunnusten mittaaminen

Interpoloiduista runkokäyristä tallennettiin koepuukohtaiset rinnankorkeusläpimitat ja läpimitat 6 metrin korkeudella mallien sovittamista varten. Interpoloituja runkokäyriä käytetään tutkimuksen jatkon suhteen sillä oletuksella, että sitä vastaavat läpimitat kuvaavat koepuiden todellisia runkokäyriä. Koska maastossa mitattu ympärysmitta ja siitä johdettu rinnankorkeusläpimita ovat olemassa kaikille koepuille, niin pistepilvestä mitattua rinnankorkeusläpimitan tarkkuutta verrataan maastomittausten tuloksiin. Tulosten perusteella nähdään millaisella tarkkuudella pistepilvestä interpoloinnin kautta saadut läpimitat vastaavat todellista maastossa mitattua läpimittaa. Pistepilvestä mitattujen läpimittojen tarkkuuden arviointia varten lasketaan muun muassa harha (kaava 2.15) ja RMSE (kaava 2.17). Kaavat ovat esitetty kappaleessa 2.7.4.

Rinnankorkeusläpimittojen ohella pistepilvestä mitataan myös koepuita vastaavat pituudet, joita verrataan tutkimuksen tuloksissa Vertexillä mitattuihin pituuksiin. Koepuukohmainen pituusestimaatti saatiin mittaamalla kahdesta keilauksesta koepuun pituus erikseen ja valitsemalla tämän jälkeen niistä suurempi pituusestimaatti. Samanlaista lähestymistapaa on käytetty aikaisemmin muun muassa Saarisen ym. (2017) tutkimuksessa. Pistepilvestä mitatun pituuden tarkkuutta verrataan tutkimuksen tuloksissa maastossa mitattuun

pituuteen muun muassa harhaa (kaava 2.15) ja RMSE:tä (kaava 2.17) käyttämällä. Kaavat ovat esitetty kappaleessa 2.7.4.

2.7 Runkokäyrä- ja tilavuusmallien sovittaminen

2.7.1 Kontrollitilavuuksien laskenta interpoloiduista runkokäyristä

Interpoloitujen runkokäyrien perusteella laskettiin jokaisesta koepuusta tilavuus, jota pidetään tutkimuksen jatkon suhteen absoluuttisena. Tilavuus laskettiin rungoista 5 cm pituisina kappaleina käyttäen katkaistun kartion tilavuuden laskentakaavaa (kaava 2.4). Katkaistun kartion kaavan on mainittu olevan tilavuuslaskentaan yhtä käyttökelpoinen ja harhaton menetelmä, kuin Newtonin kaava (Kangas ym. 2004).

$$Vol\ dm^3 = \frac{\pi * h}{3} * \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_1}{2} * \frac{d_2}{2} \right) + \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \right) \quad (2.4)$$

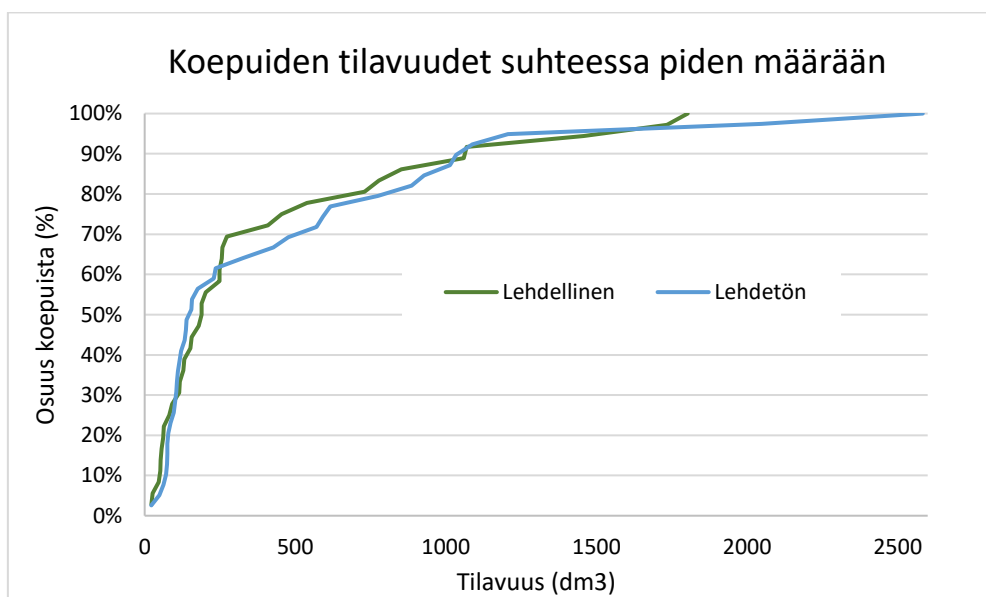
missä: h = kappaleen korkeus (0,5 dm)
d₁ = läpimitta kappaleen tyvellä (dm)
d₂ = läpimitta kappaleen päässä (dm)

Tilavuuslaskennan tuloksia on esitetty seuraavassa taulukossa (2.12). Aineistossa pienimmät puut olivat läpimitaltaan noin 10 senttimetriä ja pituudeltaan noin 5 metriä. Tämän kokoiselle puulle saatiin laskettua tilavuudeksi reilut 22 litraa. Vastaavasti aineiston suurin puu oli lehdettömään aikaan keilattu, läpimitaltaan 63,3 senttimetriä ja pituudeltaan 21,3 metriä. Aineiston suurimmalle puulle saatiin laskettua tilavuudeksi noin 2,5 kuutiometriä. Lehdettömään aikaan keilatuilla puilla laskettiin olevan tilavuuden suhteen keskimääräisesti noin 50 dm³ suurempi tilavuus kuin lehdelliseen aikaan keilatuilla koepuilla.

Taulukko 2.12. Koepuuaineistossa oleville puille lasketut tilavuudet dm³.

<i>Tilavuus dm³</i>	<i>Lehdetön</i>	<i>Lehdellinen</i>	<i>Kaikki</i>
<i>Min</i>	22,0	22,3	22,0
<i>Max</i>	2583,7	1803,2	2583,7
<i>Mediaani</i>	155,1	189,1	175,9
<i>Keskiarvo</i>	443,2	396,8	420,9

Kuvassa 2.15 on havainnollistettu lehdellisen ja lehdetömän ajankohdan koepuuaineistojen rakennetta mitattujen tilavuuksien suhteen. Kuvasta nähdään, että aineistojen rakenteet ovat tilavuuden osalta hyvin lähellä toisiaan. Jos verrataan taulukkoa 2.12 ja kuvaa 2.15, niin nähdään aineistojen keskitilavuudessa olevan eron (n. 50 dm³) syntyvän käytännössä lehdetömään aikaan mitatusta suurimmasta puusta, joka nostaa lehdetömän aineiston keskitilavuutta. Tätä lehdetömään aikaan keilattua suurinta puuta lukuun ottamatta aineistot ovat yhdenmukaiset. Koepuista noin 70 % on tilavuudeltaan alle 500 dm³, noin 15 % 500-1000 dm³ välissä ja 10 % koepuista on yli 1000 dm³ suuruisia tilavuuden suhteen.



Kuva 2.15. Koepuiden tilavuuksien rakenteellinen kehittyminen lehdellisen ja lehdetömien koepuiden välillä.

2.7.2 Runkokäyrämalli ja sen sovittaminen lehmuksille

Laasasenahon (1982) runkokäyrämalli voidaan esittää seuraavassa muodossa (kaava 2.5). Runkokäyrämallilla pystytään kuvaamaan rungon kapeneminen pituuden funktiona yhdellä mallilla ja sillä voidaan ennustaa mielivaltaisesti läpimittoja eri rungon pituuksilta. Mallissa on selitettävänä muuttujana suhdeluku, jossa on osoittajana tietyllä rungon suhteellisella korkeudella oleva läpimitta (l) ja nimittäjänä läpimitta 20 % korkeudella puun pituudesta (d_{20%}). Selittävinä muuttujina mallissa on ennustettavaa läpimittaa vastaava korkeus esitettynä suhteellisenä etäisyytenä puun latvaan.

$$\frac{d_l}{d_{20\%}} = b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^5 + b_5x^8 + b_6x^{13} + b_7x^{21} + b_8x^{34} \quad (2.5)$$

missä:

$$\begin{aligned} d_l &= \text{Läpimitta korkeudella } l \text{ maasta} \\ d_{20\%} &= 20\% \text{ korkeudella oleva läpimitta} \\ x &= 1 - \frac{l}{h} \text{ eli suhteellinen etäisyys latvasta.} \end{aligned}$$

Mallia voidaan käyttää, kun asetetaan ensin osoittajan paikalle (kaava 2.6) maastossa mitattu rinnankorkeusläpimitta ($d_{1.3}$). Kun mitatun puun pituus on tunnettu ja rinnankorkeusläpimittaa vastaava mittauskorkeuden tiedetään olevan 1,3 metriä, niin yhtälöön (kaava 2.6) jää tuntemattomaksi ainoastaan 20 % korkeutta vastaava läpimitta ($d_{20\%}$). Yhtälöstä voidaan ratkaista 20 % läpimitta seuraavasti (kaava 2.6). Kun läpimitta 20 % korkeudella tiedetään, niin tämän jälkeen yhtälöllä voidaan laskea läpimitta millä tahansa korkeudella (d_l) suhteessa läpimittaan 20 % korkeudella (kaava 2.7). Oletuksena mallissa on, että mallinnettavasta runkokäyrästä on tiedossa yksi läpimitta ja sitä vastaava korkeus, sekä lisäksi puun pituus.

$$d_{20\%} = \frac{d_{1.3}}{f(x)} \quad (2.6)$$

$$d_l = d_{20\%} * f(x) \quad (2.7)$$

Runkokäyrämallin sovittaminen lehmuksille tehtiin käyttäen R-ohjelmaa (R Development Core Team 2011). Laasasenaho (1982) on tutkimuksessaan sovittanut runkokäyrämallin käyttäen 23 kpl eri suhteellisilta korkeuksilta mitattuja läpimittoja (taulukko 2.13). Samaa lähestymistapaa hyödynnetään myös tässä tutkimuksessa. Taulukossa 2.13 on esitetty 23 kpl eri suhteellisia korkeuksia ja niitä vastaavat aineistosta lasketut selitettävät muuttujat. Selitettävät muuttujat ovat laskettu siten, että ensin jokaisesta koepuusta on etsitty läpimitat kaikilta 23 kpl eri suhteelliselta korkeudelta ja näitä läpimittoja on ver-

rattu läpimitaan 20 % korkeudella koepuussa. Lopuksi suhdeluvuista on laskettu keskiarvot koko aineiston ja osa-aineistojen sisällä. Selitettävien muuttujien laskennassa käytetyt läpimitat ovat kaikki peräisin interpoloiduista runkokäyristä. Pituustiedot, joita on käytetty suhteellisten korkeuksien laskentaan ovat sitä vastoin maastossa Vertexillä mitattuja pituuksia.

Taulukko 2.13. Suhteellisille korkeuksille lasketut läpimittojen suhdeluvut. Suhdeluvut ovat laskettu vertaamalla eri suhteellisilla korkeuksilla olevia läpimittoja 20 % korkeudella puuta olevaan läpimitaan ja laskemalla näistä suhdeluvuista keskiarvo.

nro	Suhteellinen korkeus %	Selitettävät muuttujat		
		Koko aineisto	Lehdetön	Lehdellinen
1	1,00 %	1,19	1,17	1,20
2	2,50 %	1,17	1,16	1,18
3	5,00 %	1,14	1,13	1,15
4	7,50 %	1,11	1,11	1,12
5	10 %	1,09	1,09	1,09
6	15 %	1,05	1,05	1,05
7	20 %	1	1	1
8	25 %	0,94	0,94	0,94
9	30 %	0,87	0,88	0,87
10	35 %	0,80	0,80	0,79
11	40 %	0,71	0,72	0,71
12	45 %	0,64	0,64	0,63
13	50 %	0,56	0,56	0,56
14	55 %	0,50	0,49	0,51
15	60 %	0,44	0,42	0,46
16	65 %	0,39	0,36	0,42
17	70 %	0,34	0,31	0,38
18	75 %	0,30	0,27	0,33
19	80 %	0,26	0,24	0,28
20	85 %	0,21	0,20	0,22
21	90 %	0,15	0,14	0,15
22	95 %	0,08	0,08	0,08
23	100 %	0	0	0

Mallin uudelleen sovittaminen lehmuksille tehtiin R-ohjelmalla käyttäen lineaarista regressiota. Vakiomuodossaan lineaarinen usean selittävän muuttujan regressioyhtälö voidaan ilmaista kaavan 2.8 mukaisessa muodossa (Ranta ym. 2012). Regressioanalyysissä on tarkoituksena ilmaista yhtälömuotoisesti yhden tai useamman selittävän muuttujan vaikutus selitettävän muuttujan, eli vastemuuttujan saamaan arvoon. Selittävää muuttujaa voidaan kutsua myös riippumattomaksi muuttujaksi (*independent variable*) ja selitettävää muuttujaa riippuvaksi muuttujaksi (*dependent variable*).

Lineaarisen regression tapauksessa oletuksena on, että selitettävä ilmiö ja siten vastemuuttuja on lineaarisessa riippuvuussuhteessa selittäviin muuttujiin (Ranta ym. 2012). Useamman selittävän muuttujan regressiossa selittäviä muuttujia (X_n) voi olla useampia. Selitettävässä muuttujassa olevan satunnaisvaihtelun oletetaan olevan kaikilla selittävien muuttujien arvoilla normaalisti jakautunut. Selittävällä muuttujalla ei oleteta olevan vaikutusta selitettävän muuttujan keskihajontaan. Tätä vastemuuttujan keskihajonnan neliötä nimitetään jäännösvarianssiksi ja lineaarisessa regressiossa oletuksena on tämän keskihajonnan riippumattomuus selittävien muuttujien saamista arvoista, eli vakiovarianssisuus/homoskedastisuus.

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2.8)$$

missä:

Y = selitettävä muuttuja (vastemuuttuja)
 X_n = selittävä muuttuja/muuttujat
 β_n = mallin kertoimet
 α = mallin vakiotermi
 ε = mallin satunnaisvaihtelua ilmaiseva virhetermi

Sovitettaessa runkokäyrämallia lehmusaineistoon, niin regressioyhtälössä (kaava 2.9) jätetään vakiotermi yhtälön ulkopuolelle. Ilman vakiotermiä malli saadaan kulkemaan origon kautta. Tällöin malli antaa suhteellisen läpimitan arvoksi nolla pituudella, joka vastaa puun kokonaispituutta. Läpimitan nolla-arvo puun pituutta vastaavalla korkeudella saadaan siten vakioitua. Sen lisäksi malliin asetetaan lineaarinen rajoite, joka pakottaa mallin kulkemaan pisteen (0.8, 1) kautta. Sen johdosta malli antaa 20 % korkeudella puuta aina arvon 1.

$$(y_i - y_0) = \beta_1(x_1 - x_0) + \beta_2(x_2 - x_0)^2 + \beta_3(x_3 - x_0)^3 + \beta_4(x_4 - x_0)^5 + \beta_5(x_5 - x_0)^8 + \beta_6(x_6 - x_0)^{13} + \beta_7(x_7 - x_0)^{21} + \beta_8(x_8 - x_0)^{34} \quad (2.9)$$

missä:

y_i = korkeutta (i) vastaavan läpimitan suhde läpimittaan 20 % korkeudella puuta.

y_0 = y: n arvo 20 % korkeudella puuta.

$x_i = 1 - \frac{i}{h}$ eli suhteellinen etäisyys latvasta korkeudella i.

x_0 = x: n arvo 20 % korkeudella puuta.

Laasasenaho (1982) huomasi sovittaessaan runkokäyrämallia kuuselle, että yksi selittävä muuttuja ei ollut tilastollisesti merkitsevä p-arvolla mitattuna. Sen vuoksi tämä muuttuja poistettiin kokonaan mallista. Runkokäyrämallien sovittamisessa lehmuksille huomioitiin myös tämä sama mahdollisuus, että kaikkia selittäviä muuttujia ei välttämättä pidetä mukana mallissa, jos ne eivät ole tilastollisesti merkitseviä. Vaihtoehtoinen malli päädyttiin siksi sovittamaan käyttäen askeltavaa (stepwise) regressiota, jotta malliin löydettäisiin paras mahdollinen selittävien muuttujien yhdistelmä. Menetelmä toteutettiin taaksepäin kulkevana (backward elimination), jossa aineistoon sovitetaan ensin malli kaikilla 8 kpl selittävillä muuttujilla. Ensimmäisen sovituksen jälkeen menetelmä lähtee vähentämään selittäviä muuttujia mallissa yksi kerrallaan aina siitä muuttujasta lähtien, jonka t-testistä saama arvo on kaikkein pienin (Ranta ym. 2012). Lopulta menetelmä päättyy tilanteeseen, jossa muuttujien vähentäminen ei enää paranna mallin selittävyyttä.

2.7.3 Tilavuusmallien uudelleen sovittaminen lehmuksille

Laasasenaho (1982) tilavuusmalleja on puolajikohtaisesti yhteensä kolme eri mallia, jotka poikkeavat toisistaan siinä, mitä maastossa mitattuja tunnuksia malleissa käytetään. Malleista yksinkertaisin perustuu pelkästään rinnankorkeusläpimittaan, eikä se mallia käytettäessä vaadi mitään muuta ennustettavasta puusta mitattua tunnusta mallintamisen pohjaksi, kuin rinnankorkeusläpimitan. Toinen tilavuusmalli käyttää kahta maastossa mitattua tunnusta: rinnankorkeusläpimittaa ja puun pituutta. Kolmas tilavuusmalli perustuu rinnankorkeusläpimitan ja pituuden lisäksi niin kutsuttuun yläläpimittaan, joka on läpimitta 6 metrin korkeudella maasta.

Mallien sovittamisessa käytetyt rinnankorkeusläpimitat ja läpimitat 6 metrin korkeudella ovat peräisin interpoloiduista runkokäyristä. Näin tehtiin sen vuoksi, että tutkimuksessa oletetaan interpoloituen runkokäyrien kuvaavan todellisia koepuiden runkokäyriä. Mallien sovittamisessa käytetyt puiden pituudet sen sijaan olivat maastossa Vertexillä mitattuja pituuksia.

Rinnankorkeuteen perustuva tilavuusmalli

Tilavuusmallien uudelleen sovittamista varten tilavuussyhtälöt muunnettiin sellaiseen muotoon, jotta ne ovat sovitettavissa lehmuksille lineaarista regressiota käyttäen. Kaavassa 2.10 *vol* on puun runkotilavuus litroina ja *dbh* on rinnankorkeusläpimitta senttimetreinä. Rinnankorkeusläpimittaan perustuvassa tilavuusmallissa vastemuuttujalle on tehty logaritmimuunnos ottamalla tilavuudesta luonnollinen logaritmi (kaava 2.10). Jos tarkastellaan mallin selittävien muuttujien korrelaatioita suhteessa vastemuuttujaan, niin korrelaatioiden olevan kummankin selittävän muuttujan tapauksessa vahva (taulukko 2.14).

$$\textbf{Malli 1: } f(dbh): Y_i = \beta_0 + \beta_1(x_1) + \beta_2(x_2) + \varepsilon_i \quad (2.10)$$

missä:

$$\begin{aligned} Y_i &= \ln(vol) \\ x_1 &= \ln(2 + 1,25dbh) \\ x_2 &= dbh \end{aligned}$$

Taulukko 2.14. Selittävien muuttujien korrelaatiot vastemuuttujan kanssa rinnankorkeusläpimittaan perustuvassa tilavuusmallissa.

	<i>f(dbh)</i>	<i>Y_i (Lehdetön)</i>	<i>Y_i (Lehdellinen)</i>	<i>Y_i (Kaikki)</i>
<i>x₁</i>	$\ln(2 + 1,25dbh)$	0,97	0,95	0,96
<i>x₂</i>	<i>dbh</i>	0,99	0,99	0,99

Rinnankorkeuteen ja pituuteen perustuva tilavuusmalli

Laasasenahon (1982) rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuva tilavuusmalli on tyypiltään allometrinen tulomuotoinen tilavuusmalli (Maltamo ja Laukkanen 2001). Se on muutettu lineaarisella regressiolla sovitettavaan muotoon kaavan 2.11 osoittamalla tavalla. Kaavassa 2.11 *vol* on puun runkotilavuus litroina, *dbh* on rinnankorkeusläpimitta senttimetreinä ja *h* puun pituus metreinä. Mallin vastemuuttujana on tilavuuden luonnollinen logaritmi samaan tapaan kuin yhden tunnuksen tilavuusmallissa. Taulukossa 2.15 on esitetty mallin selittävien muuttujien korrelaatiot suhteessa vastemuuttujaan. Korrelaatiot ovat aineiston perusteella hyvin korkeat ja niistä nähdään, että selitettävä muuttuja on vahvassa riippuvuudessa kaikkien selittävien muuttujien kanssa.

$$\text{Malli 2: } f(dbh, h): Y_i = \beta_0 + \beta_1(x_1) + \beta_2(x_2) + \beta_3(x_3) + \beta_4(x_4) + \varepsilon_i \quad (2.11)$$

missä:

$$\begin{aligned} Y_i &= \ln(vol) \\ x_1 &= \ln(dbh) \\ x_2 &= \ln(h) \\ x_3 &= \ln(h - 1,3) \\ x_4 &= dbh \end{aligned}$$

Taulukko 2.15. Selittävien muuttujien korrelaatiot vastemuuttujan kanssa rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen pohjautuvassa mallissa

	$f(dbh, h)$	Y_i (Lehdetön)	Y_i (Lehdellinen)	Y_i (Kaikki)
x_1	$\ln(dbh)$	0,99	0,99	0,99
x_2	$\ln(h)$	0,96	0,91	0,94
x_3	$\ln(h - 1,3)$	0,96	0,93	0,94
x_4	(dbh)	0,97	0,95	0,96

Rinnankorkeuteen, pituuteen ja yläläpimittaan perustuva tilavuusmalli

Kolmen tunnuksen tilavuusmallissa on rinnankorkeusläpimitan ja pituuden ohella mallissa on mukana myös läpimitta 6 metrin korkeudella puuta. Malli on muunnettu lineaarisella regressiolla tehtävän sovituksen vaatimaan muotoon kaavassa 2.12. Tällöin vastemuuttujana on muotoluku, jossa tilavuudelle on tehty muunnos, jossa sitä jaetaan kaavassa 2.12 esitetyllä läpimitasta ja pituudesta riippuvaisella nimittäjällä. Muunnos saa aikaan, että vastemuuttujan lukuarvo pienenee ja sen vaihteluväli koko aineiston tapauksessa on välillä 0,31-0,65. Kaavassa 2.12 vol kuvaa puun runkotilavuutta litroina, dbh rinnankorkeusläpimittaa senttimetreinä, h puun pituutta metreinä ja d_6 yläläpimittaa senttimetreinä.

Kolmen tunnuksen tilavuusmallin osalta myös laskettiin taulukkoon 2.16 vastemuuttujan ja selittävien muuttujien välisiä korrelaatioita. Taulukosta nähdään, että korrelaatiot ovat alhaisempia kuin verrattuna kaavojen 2.10 ja 2.11 esittämien mallien vastaaviin korrelaa-

tioihin vastemuuttujan ja selittävien muuttujien välillä. Vahvimmin korreloitunut selittävä muuttuja vaikuttaisi olevan muuttuja X_4 . Lisäksi selittävistä muuttujista kolme on negatiivisesti korreloituneita vastemuuttujan suhteen. Negatiivinen korrelaatio tarkoittaa, että selittävän muuttujan kasvu vaikuttaa vastemuuttujan arvoa alentavasti.

Malli 3: $f(dbh, h, d_6)$: $Y_i = \beta_0 + \beta_1(x_1) + \beta_2(x_2) + \beta_3(x_3) + \beta_4(x_4) + \beta_5(x_5) + \varepsilon_i$

(2.12)

missä:

$$Y_i = \left(\frac{vol}{\left(\frac{\pi}{40} * dbh^2 * h \right)} \right)$$

$$x_1 = dbh$$

$$x_2 = h$$

$$x_3 = \left(\frac{1}{h} \right)$$

$$x_4 = \left(\frac{dbh^2 + dbh * d_6 + d_6^2}{dbh^2 * h} \right)$$

$$x_5 = \left(\frac{d_6^2 * (h - 6,0)}{dbh^2 * h} \right)$$

Taulukko 2.16. Selittävien muuttujien korrelaatiot vastemuuttujan kanssa rinnankorkeusläpimittaan, pituuteen ja yläläpimittaan perustuvassa tilavuusmallissa

	$f(dbh, h, d_6)$	Y_i (Lehdetön)	Y_i (Lehdellinen)	Y_i (Kaikki)
x_1	dbh	-0,61	-0,61	-0,61
x_2	h	-0,63	-0,71	-0,67
x_3	$\left(\frac{1}{h} \right)$	0,74	0,78	0,76
x_4	$\left(\frac{dbh^2 + dbh * d_6 + d_6^2}{dbh^2 * h} \right)$	0,83	0,79	0,81
x_5	$\left(\frac{d_6^2 * (h - 6,0)}{dbh^2 * h} \right)$	-0,43	-0,47	-0,44

Harhattomuuskorjaus

Kaavoissa 2.10 ja 2.11 esitettyjen yhden ja kahden tunnuksen tilavuusmallien tapauksessa on huomioitava malleihin ennustettaessa tehtävä jäännöskeskijointaan perustuva harhattomuuskorjaus. Logaritmuunnettuun vastemuuttuun sisältyy log-normaalijakautunut virhetermi, joka kuvaa mallin selittämättömän riippuvuuden osuutta (Picard ym. 2012). Harhattomuuskorjauksena käytetään kaavan 2.13 osoittamaa mallin jäännösvarianssin (σ^2) puolikasta, joka summataan mallin vakiotermiin ennen logaritmuunnoksen palauttamista (Parresol 1999).

$$y_i = \exp \left(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \cdots \beta_n x_n + \left(\frac{\sigma^2}{2} \right) \right) \quad (2.13)$$

2.7.4 Mallien sovittamisessa käytetyt mallinnusaineistot ja mallien hyvyyden arviointi

Tutkimuksessa käytettävä koepuuaineisto on kooltaan niin pieni, että aineisto pyritään käyttämään mallintamiseen mahdollisimman tehokkaasti hyväksi. Tutkimuskysymysten perusteella mallit tullaan sovittamaan erikseen osa-aineistoille, eli lehdellisen ja lehdetömän ajan koepuille. Tämän lähestymistavan kautta pyritään saamaan selvyys, onko eri ajankohtaan keilatulla aineistolla mallin sovittamisen hyvyyden kannalta eroa. Mallien sopivuutta aineistoihin vertaillaan selittäviä muuttujia vastaavien kertoimien p-arvoja ja niiden tilastollista merkitsevyyttä vertailemalla. Lisäksi tarkastellaan mallin jäännösvarianssien suuruutta, mallin selitysasetta (kaava 2.14) sekä malleja vastaavaa tilastollista merkitsevyyttä. Jotta voitaisiin tutkimuksen tuloksissa ottaa kantaa myös aineiston koon merkitykseen, niin mallien sovitus tehdään myös yhdellä kertaa kaikkiin aineiston koepuihin, jolloin sovittamisen tuloksista voidaan päätellä, paraneeko sovitus, jos mallinnusaineistoa kasvatetaan. Mallien sovitus tehdään siis yhteensä kolmesti, ensin osa-aineistoihin ja sitten koko aineistoon.

Runkokäyrämallin hyvyyden arviointia tehdään kahdella tavalla: visuaalisella tarkastelulla ja ristiinvaliidointia käyttäen. Visuaalisessa tarkastelussa runkokäyrämallit esitetään samassa kuvaajassa pistepilvestä interpoloitujen runkokäyrien kanssa, joiden oletetaan kuvaavan koepuiden todellista runkokäyrää. Visuaalisella tarkastelulla katsotaan miten

hyvin runkokäyrämallit sopivat aineistoon. Ristiinvalidointi suoritetaan Leave-one-out ristiinvalidointia (LOOCV, leave-one-out cross-validation) käyttämällä. Ristiinvalidoinnissa malli sovitetaan vuoron perään jättämällä yksi koepuu sovituksen ulkopuolelle ja ennustamalla sitten sovitetulla mallilla tälle koepuulle tilavuustieto. Tilavuus lasketaan ristiinvalidoinnin yhteydessä kuutioimalla mallista laskettua runkokäyrää katkaistun kartion tilavuuskaavalla (kaava 2.4) 5 cm pituusvälein. Näitä ristiinvalidoinnin tuloksena saatuja runkotilavuuksia verrataan todellisiin pistepilvestä interpoloituihin runkotilavuuksiin. Vertailussa hyödynnetyt tunnusluvut ovat harha (kaava 2.15), RMSE (kaava 2.17) ja keskivirhe (2.19). Ennustettujen- ja mitattujen tilavuuksien erosta muodostetaan lisäksi residuaalikuvaajat.

Tilavuusmallien hyvyyden testaaminen tehdään ensimmäisessä vaiheessa mallien sovituksen yhteydessä ristiinvalidointia käyttämällä. Menetelmänä käytetään Leave-one-out ristiinvalidointia (LOOCV, leave-one-out cross-validation). Menetelmä validoi mallit jättämällä sovituksen ulkopuolelle vuoron perään yhden koepuun ja ennustamalla sille tilavuuden loppuaineistoon sovitetun mallin avulla. Ristiinvalidoinnista saatuja tilavuusestimaatteja verrataan interpoloiduista runkokäyristä laskettujen todellisiin tilavuuksiin. Tunnuslukuina käytetään harhaa (kaava 2.15), RMSE:tä (kaava 2.17) ja selityssastetta (2.19). Ennustettujen- ja mitattujen tilavuuksien erosta muodostetaan lisäksi residuaalikuvaajat.

Selitysaste (R^2) (kaava 2.14) on tunnusluku, joka kertoo miten suuren osuuden vastemuuttujassa olevasta vaihtelusta malli selittää (Kangas ym. 2011). Selitysasteen saadessa arvon 1, malli selittää kaiken vastemuuttujassa olevan vaihtelun. Tunnuslukua käytetään arvioitaessa mallin sopivuutta aineistoon.

Harhalla (kaava 2.15) voidaan kuvata malliin sisältyvän systemaattisen virhetermin suuruutta. Harhaa laskettaessa summataan yhteen ennusteiden positiiviset aliarviot ja niiden negatiiviset yliarviot. Tällöin virheet osittain kumoavat toisensa ja jäljelle jää joko aliarviota ilmentävä positiivinen luku, tai yliarviota ilmentävä negatiivinen luku. Tämä suhteutetaan populaation keskitilavuuteen, jolloin saatu tulos kertoo systemaattisen virheen suhteellisen määrän (kaava 2.16).

RMSE (kaava 2.17), eli *root-mean-square error* on runsaasti metsäalalla käytetty tarkkuutta kuvaava mittari (Kangas ym. 2011). RMSE lasketaan ottamalla neliöjuuri keskineliövirheestä, joka sisältää systemaattisen ja satunnaisen virhetermin (Husch ym. 1982).

Mitä pienemmän arvon RMSE antaa, niin sitä tarkempi malli on ja sitä vähemmän siinä on virhettä. Ennustevirheen korottaminen toiseen potenssiin saa aikaan, että RMSE:n arvot ovat aina positiivisia. Virheiden neliöiden summa suhteutetaan populaation lukumäärään ja jäljelle jäänyt arvo palautetaan neliöjuuren avulla takaisin vastaamaan alkuperäistä tilavuusyksikköä. RMSE voidaan myös suhteuttaa harhan tapaan populaation keskitilavuuteen, jolloin tunnusluku kertoo virheen keskimääräisen suuruuden (kaava 2.18).

Keskivirhe (kaava 2.19) on RMSE:n ohella yksi metsänarvioimistieteen käytetyimmistä mittareista tiedon laadulle (Kangas ym. 2011). Se lasketaan virheen varianssin neliöjuurena. Ennustettujen tilavuuksien osalta lasketaan ensin niissä olevan virheen suuruudet. Koepuukohtaisista tilavuusvirheistä lasketaan tämän jälkeen keskihajonta. Tunnusluku voidaan muuttaa suhteelliseksi vertaamalla sitä populaation keskitilavuuteen (kaava 2.20).

$$Selitysaste (R^2) = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.14)$$

$$harha = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (2.15)$$

$$harha \% = 100 * \frac{harha}{\bar{y}} \quad (2.16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2.17)$$

$$RMSE \% = 100 * \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (2.18)$$

$$Keskivirhe (SE) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{n - 1}} \quad (2.19)$$

$$Keskivirhe \% = 100 * \frac{SE}{\bar{y}} \quad (2.20)$$

missä:

y_i = mitattu tilavuus koepuusta (i) dm^3

\hat{y}_i = mallilla ennustettu tilavuus koepuusta (i) dm^3

\bar{y} = mitattujen tilavuuksien keskiarvo dm^3

n = populaation koko (kpl)

$\bar{\varepsilon}$ = tilavuusestimaattien keskimääräinen virhe dm^3

ε_i = Tilavuusennusteen virhe koepuussa (i) dm^3

2.7.5 Lehmukselle sovitettujen mallien vertailu koivun runkokäyrä- ja tilavuusmalleihin

Koivun runkokäyrämalli

Laasasenahon (1982) koivulle sovitettua runkokäyrämallia käytetään tässä tutkimuksessa yhtenä keinona vertailla lehmuksille sovitettujen runkokäyrämallien parametrisoinnin onnistumista. Vertailua tehdään visuaalisesti vertailemalla lehmuksille sovitettujen runkokäyrämallien ja koivulle sovitettujen runkokäyrämallien istuvuutta lehmusten interpoloituihin runkokäyriin. Mallien sopivuutta koepuuaineistoon vertaillaan myös laskemalla katkaistun kartion tilavuuskaavaa (kaava 2.4) käyttämällä 5 cm pituusvälein tilavuusestimaatit koivun runkokäyrämallilla ennustetusta runkokäyristä. Näitä tilavuuksia verrataan interpoloiduista runkokäyristä vastaavalla tavalla laskettuihin tilavuuksiin. Koivun runkokäyrämallissa käytetään interpoloiduista runkokäyristä saatua rinnankorkeusläpimittaa sekä maastomittausten yhteydessä Vertexillä mitattua puun pituutta. Todellisten tilavuuksien ja koivun runkokäyrämallilla saatujen tilavuuksien eroista lasketaan harhaa (kaava 2.15) ja RMSE:tä (kaava 2.17) kuvaavat tunnusluvut. Lisäksi tilavuusestimaattien eroista muodostetaan residuaalikuvaajat. Koivulle sovitettua mallia käytetään, koska lehtipuun mallin oletetaan lähtökohtaisesti soveltuvan toiselle lehtipuulle paremmin, kuin havupuulle sovitettu malli. Laasasenahon (1982) laatiman koivun runkokäyrämallin parametrit ovat esitetty taulukossa 2.17.

Taulukko 2.17. Laasasenahon (1982) runkokäyrämallin parametrit koivulle.

Parametrit	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8
Koivu	0,93838	4,106	-7,8517	7,8993	-7,5018	6,3863	-4,3918	2,1604

Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämallia verrataan lisäksi lehmukselle sovitettuun runkokäyrämalliin Studentin yksisuuntaisen parittaisen t-testin avulla. T-testin arvot laskettiin tilavuusennusteiden ja todellisten tilavuuksien erotuksesta, jotka olivat ennen testiä muunnettu itseisarvoiksi. Todellisina tilavuuksina käytettiin interpoloiduista runkokäyristä laskettuja tilavuuksia. Lehmuksen malleilla ennustetut tilavuudet ovat Leave-one-out -ristiinvalidoinnin kautta saatuja tilavuusestimaatteja. T-testin nollahypoteesi on, että mallien välisissä tarkkuuksissa ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa. Vastaavasti vaihtoehtoinen hypoteesi astuu voimaan, jos mallien välisen tarkkuuseron havaitaan olevan tilastollisesti merkitsevä. T-testi suoritetaan yksisuuntaisena, koska lähtökohtaisesti odotetaan, että lehmukselle sovitettu runkokäyrämalli toimii koivun runkokäyrämallia tarkemmin.

$$H_0: f(\text{lehmus}) = f(\text{koivu})$$

$$H_1: f(\text{lehmus}) \neq f(\text{koivu})$$

Koivun tilavuusmallit

Koivun tilavuusmalleja käytettiin myös tutkimuksessa vertailukohtana lehmuksille sovitettujen tilavuusmallien hyvyyden arvioinnissa. Lehmuksen tilavuusmalleilla ja koivun tilavuusmalleilla ennustetaan runkotilavuudet koepuuaineistossa ja näiden ennusteiden tarkkuutta vertaillaan pistepilvistä interpoloiduista runkokäyristä laskettuihin tilavuuksiin. Tilavuusmalleissa käytetyt muuttujat ovat läpimittojen osalta peräisin interpoloiduista runkokäyristä ja pituudet ovat maastossa Vertexillä mitattuja.

R-ohjelmaa käyttäen ennustettiin jokaiselle koepuulle Laasasenahon (1982) tilavuusmallien mukaiset tilavuusennusteet. Tilavuuden ennustamisessa käytetyt koivun tilavuusmallit ovat esitetty kaavoissa 2.21, 2.22 ja 2.23. Koivun tilavuusmalleja vertaillaan lehmukselle sovitettuihin malleihin lähtökohtaisesti samasta syystä, kuin runkokäyrämallienkin tapauksessa. Kahden lehtipuun välinen allometrinen suhde oletetaan vahvemmaksi, kuin lehtipuun ja havupuun välinen suhde. Myös esimerkiksi Valtakunnan metsien inventoinneissa on todettu myös käytettävän muiden lehtipuiden, kuin koivun, lepän ja haavan tilavuuden ennustamisessa Laasasenahon (1982) tilavuusmalleja (Salminen 1993; Korhonen ym. 2017). Koivun tilavuusmallien ja lehmuksen tilavuusmallien välisiä tarkkuuseroja vertaillaan käyttäen harhaa (kaava 2.15), RMSE:tä (kaava 2.17) ja keskivirhettä (kaava 2.19).

$$f(d) \quad \ln(v) = -5,41948 + 3,57630 \ln(2 + 1,25d) - 0,0395855d \quad (2.21)$$

$$f(d, h) \quad v = 0,011197d^{2,10253}(0,98600)^d h^{3,98519}(h - 1,3)^{-2,65900} \quad (2.22)$$

$$f(d, h, d_6) \quad v = 0,226547d^2 - 0,0104691d^2h - 0,000122258d^3h + 0,000438033d^2h^2 + 0,0991620(d^2 + d * d_6 + d_6^2) + 0,0334836d_6^2(h - 6) \quad (2.23)$$

missä: v = puun tilavuus (dm^3)
 d = läpimitta rinnankorkeudella 1,3m (cm)
 d_6 = läpimitta 6 metrin korkeudella (cm)
 h = puun pituus (m)

Laasasenahon (1982) koivun tilavuusmalleja ja lehmukselle sovitettuja tilavuusmalleja vertailtiin lisäksi Studentin yksisuuntaisen parittaisen t-testin avulla. Testi suoritettiin vastaavalla tavalla, kuin runkokäyrämallien tapauksessa ennustettuja tilavuuksia vastaavien tarkkuuksien itseisarvoista. Interpoloiduista runkokäyristä estimoituja tilavuuksia kohdeltiin todellisina tilavuuksina, joihin mallien ennustamia tilavuusestimaatteja verrattiin. Lehmuksen mallien osalta tilavuusestimaatteina käytettiin ristiinvalidoinnin kautta saatuja tilavuuksia. T-testissä nollahypoteesina on, kuten runkokäyrämalleillakin, että mallien välisissä tarkkuuksissa ei odoteta olevan tilastollisesti merkitsevää eroa. Vaihtoehtoisena hypoteesina sitä vastoin on, että mallien välisissä tarkkuuksissa on ero, jonka oletetaan lähtökohtaisesti olevan lehmuksille sovitetuille malleille edullinen.

3 TULOKSET

3.1 Läpimittojen ja pituuksien mittaustarkkuus pistepilvestä

Maastolaserkeilausta koskevissa menetelmätutkimuksissa on usein raportoitu rinnankorkeusläpimitan ja pituuden osalta mittaustarkkuudet verrattuna maastossa mitattuihin vastaaviin tunnuksiin (kts. Kankare ym. 2013; Liang ym. 2014; Saarinen ym. 2017). Pistepilvestä mitattu läpimitta vastaa splini-interpoloinnista saatua rinnankorkeusläpimittaa. Referenssinä käytetyt rinnankorkeusläpimitat laskettiin maastossa mitatusta ympärysmittasta johdettuna, koska osaa koepuista oli läpimitaltaan niin suuria, ettei mittasaksilla saatu mittausta tehtyä. Ristiläpimitta mitattiin kuitenkin mahdollisimman monesta koepuusta, jotta sen eroa ympärysmittasta johdetun läpimitan tarkkuuteen voitaisiin jälkikäteen arvioida. Tulokset osoittavat, että ristiläpimittojen keskiarvot olivat noin 0,5 cm aliarvioita verrattuna ympärysmittasta johdettuun läpimittaan (taulukko 3.1).

Taulukko 3.1. Maastossa mittasaksilla mitatun läpimitan mittausrvirhe ja mittaustarkkuudet verrattuna ympärysmittasta johdettuun läpimittaan.

<i>Lpm cm (n=68)</i>	<i>Kaikki</i>
<i>Min</i>	<i>-0,6</i>
<i>Max</i>	<i>5,0</i>
<i>Mediaani</i>	<i>0,3</i>
<i>Keskiarvo</i>	<i>0,5</i>
<i>RMSE</i>	<i>1,1</i>
<i>RMSE %</i>	<i>4 %</i>
<i>Harha</i>	<i>0,5</i>
<i>Harha %</i>	<i>2 %</i>

Läpimitan mittaustarkkuudet ovat esitetty taulukossa 3.2. Tuloksista voidaan nähdä, että läpimitat saatiin pistepilvestä mitattua noin 2,4 cm tarkkuudella (RMSE), joka vastaa suhteellisesti 8,6 % suuruista virhettä verrattuna populaation keskiläpimittaan. Läpimitan mittaustarkkuudessa on jonkin verran havaittavissa harhaisuutta, jonka vuoksi pistepilvestä mitatut läpimitat ovat noin 1,1 cm verran aliarvioita. Tämä vastaa suhteellisesti 4 % suuruista aliarviota läpimitassa suhteessa populaation keskiläpimittaan. Eri ajankohtina tehtyjen keilausten tuloksista voidaan nähdä, että ajankohdalla ei ole olennaisesti vaikutusta läpimitan mittaustarkkuuteen. Lehdettyä aikaan keilattujen koepuiden osalta tulokset osoittavat suhteellisesti 1 % harhaisemmat läpimitan mittaustulokset.

Taulukko 3.2. Rinnankorkeusläpimitan mittausvirheet ja mittaustarkkuudet pistepilvestä. Taulukossa on verrattu interpoloinnilla saatua runkokäyrää maastossa mitatusta puun ympärysmitasta johdettuun läpimittaan.

Rinnankorkeus- läpimitta (cm)	Lehdetön	Lehdellinen	Kaikki
<i>Min</i>	-7,9	-10,6	-10,6
<i>Max</i>	3,9	3,3	3,9
<i>Mediaani</i>	-1,0	-0,9	-1,0
<i>Keskiarvo</i>	-1,3	-1,0	-1,1
<i>RMSE</i>	2,4	2,4	2,4
<i>RMSE %</i>	8,6 %	9,0 %	8,8 %
<i>Harha</i>	-1,3	-1,0	-1,1
<i>Harha %</i>	-4,5 %	-3,5 %	-4,0 %

Pistepilvestä mitattujen pituuksien tarkkuudet ovat esitetty taulukossa 3.3. Pituusmittauksessa vertailupituutena ovat maastossa Vertexillä mitatut koepuiden pituudet. Pistepilvestä pituudet mitattiin keilauksista erikseen, mutta koepuukotaiseksi pituusestimaatiksi valittiin näistä mittauksista suurempi pituus. Puun pituus tallennettiin pistepilven korkeimmasta kohdasta, jonka voitiin visuaalisesti havainnoida kuuluvan koepuun latvukseen.

Tulosten mukaan pituusmittauksen tarkkuudet olivat pistepilvestä noin 1 metrin luokkaa RMSE:llä mitattuna. Suhteellisesti virheen suuruus on noin 8 % populaation keskipituuteen verrattuna. Ajankohdalla ei sanottavasti näyttäisi olevan vaikutusta pituusmittauksen virheen suuruuteen. Systemaattista aliarviota pituusmittauksissa näyttäisi lehdettömään aikaan olevan noin 10 cm ja lehdelliseen aikaan noin 30 cm. Suhteellisesti systemaattista virhettä oli lehdettömään aikaan 1 % ja lehdelliseen aikaan 3 %. Jos tarkastellaan taulukosta pituusmittaustarkkuuden minimiarvoja, niin suurimmat aliarviot pituusmittauksessa olivat 3-4 metrin suuruisia.

Taulukko 3.3. Pituuden mittausvirheet ja mittaustarkkuudet pistepilvestä suhteessa maastossa Vertexillä mitattuun pituuteen.

Metriä	Lehdetön	Lehdellinen	Kaikki
<i>Min</i>	-4,0	-3,6	-4,0
<i>Max</i>	1,0	1,2	1,2
<i>Mediaani</i>	0,0	-0,2	0,0
<i>Keskiarvo</i>	-0,1	-0,3	-0,2
<i>RMSE</i>	0,9	1,0	0,9
<i>RMSE %</i>	7,4 %	8,4 %	7,9 %
<i>Harha</i>	-0,1	-0,3	-0,2
<i>Harha %</i>	-1,2 %	-3,0 %	-2,0 %

Läpimittojen määrä rungolta

Läpimittojen määrällä runkoa kohden tarkoitetaan runkokäyräalgoritmillä rungon pistepilveen sovitettujen läpimittojen lukumäärää suhteessa teoreettiseen läpimittahavaintojen määrään, joka rungolle olisi sovitettavissa. Koepuukohtainen läpimittojen maksimimäärä saadaan laskettua maastossa mitatusta pituudesta ja läpimittojen korkeusvälistä, jonka välein algoritmista saadaan läpimittaennusteet. Taulukossa 3.4 esitetyt suhteelliset tunnusluvut ovat laskettu vertaamalla algoritmillä saatujen läpimittojen määrää teoreettiseen maksimimäärään puukohtaisesti. Läpimittojen määrä laskettiin puukohtaisesti kahdessa erillisessä keilauksessa saadun runkokäyrän yhdistämisen ja suodattamisen jälkeen.

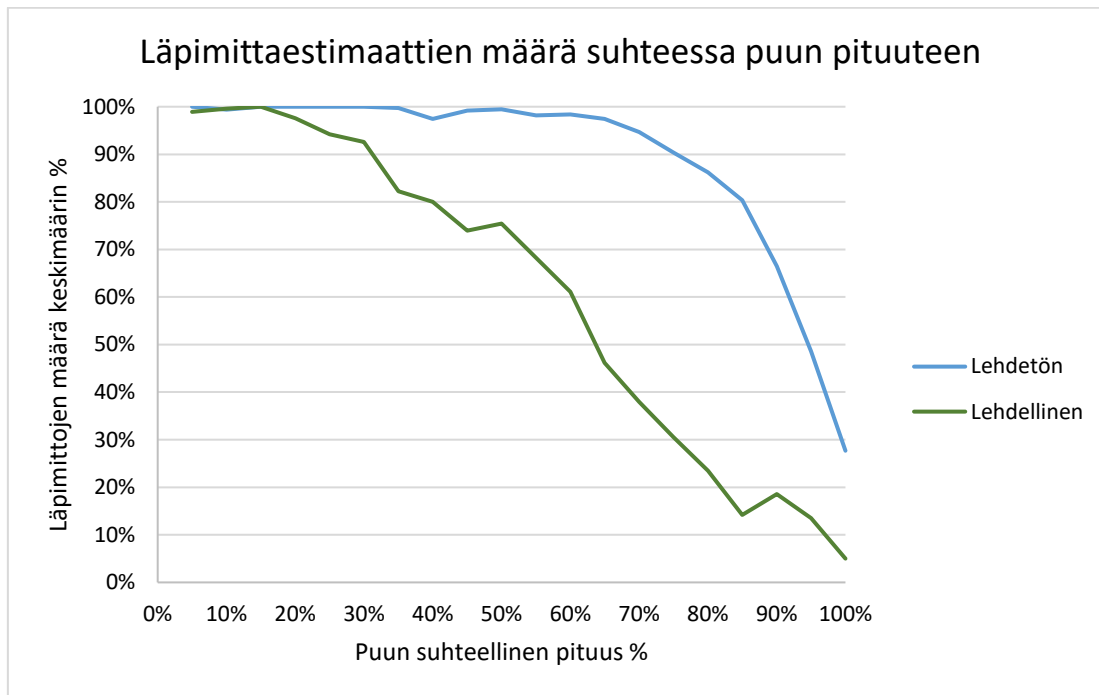
Tuloksista (taulukko 3.4) on nähtävissä selkeä ero lehdettömän ja lehdellisen ajankohdan keilausten välillä. Lehdettömänä ajankohtana saatiin runkokäyräalgoritmillä estimoitua läpimittoja keskimäärin 89 % teoreettisesta läpimittojen määrästä. Lehdelliseen aikaan keskiarvoksi saatiin 60 %. Alimmillaan runkokäyräalgoritmillä estimoituja läpimittoja saatiin lehdettömään aikaan 60 % ja lehdelliseen aikaan 34 % teoreettisesta maksimista.

Taulukko 3.4. Runkokäyräalgoritmillä mitattujen läpimittojen määrä suhteessa puun pituuteen.

Tunnus	Lehdetön	Lehdellinen	Kaikki
<i>Min %</i>	60 %	34 %	34 %
<i>Max %</i>	100 %	85 %	100 %
<i>Mediaani %</i>	90 %	62 %	78 %
<i>Keskiarvo %</i>	89 %	60 %	75 %

Kuvassa 3.1 on havainnollistettu runkokäyräalgoritmillä saatua läpimittaestimaattien suhteellista määrää koepuun suhteelliseen pituuteen. Kuvaajien taustalla on 20 eri suh-

teellista korkeutta välillä 5-100 % koepuun pituudesta. Tulosten perusteella erot keilaus-
ajankohtien välillä ovat selkeästi nähtävissä. Lehdettömään aikaan läpimittaestimaatteja
saatiin rungon pistepilvestä kattavasti noin 65 % suhteelliselle korkeudelle saakka. Tä-
män jälkeen läpimittaestimaattien määrä alkoi jyrkästi vähentyä latvaa kohden. Lehdelli-
seen aikaan sitä vastoin läpimittaestimaatteja saatiin kattavasti noin 20 % suhteelliselle
korkeudelle saakka, jonka jälkeen läpimittahavaintojen määrä alkoi jyrkästi alentua.



Kuva 3.1. Runkokäyräalgoritmilla estimoitujen läpimittojen määrä keskimäärin suhteessa koepuun suhteelliseen pituuteen.

3.2 Runkokäyrämallin sovittamisen tulokset

Runkokäyrämallin sovittaminen ja sovituksen hyvyttä kuvaavat tunnusluvut ovat esitetty taulukoissa 3.5, 3.6 ja 3.7. Sovitus tehtiin erikseen osa-aineistoihin ja koko aineistoon. Selitysasteet saavat jokaisen mallin tapauksessa arvon 1, sillä sovitettava polynomimalli on hyvin notkea ja kulkee siksi kaikkien 23 kpl vastemuuttujana olevan suhteellisen läpimitan kautta. Jos verrataan mallien kesken jäännöskeskiahajontoja, niin alhaisimmat keskihajonnat saadaan mallilla, joka on sovitettu koko aineistoon. Sovitusta saatiin lisäksi hieman parannettua jättämällä β_4 vastaava selittävä muuttuja mallin ulkopuolelle.

Mallit sovitettiin kahteen mallinnusaineistoon käyttämällä kaikkia kahdeksaa selittävää muuttujaa. Tämän jälkeen etsittiin taaksepäin kulkevan askeltavan regression (stepwise) avulla optimaalisin selittävien muuttujien yhdistelmä. Yleisesti ottaen askeltavalla regressiolla saatiin lehdettömän koepuuaineiston (taulukko 3.6) ja koko aineiston (taulukko 3.5) tapauksessa parannettua mallin sopivuutta, kun yksi tai useampi selittävä muuttuja jätettiin mallin ulkopuolelle. Lehdellisten koepuiden tapauksessa (taulukko 3.7) askeltavan regression myötä mallista ei jätetty ainuttakaan selittävää muuttujaa mallin ulkopuolelle. Jos vertaillaan lehdetöntä ja lehdellistä aineistoa mallin sovittamisessa, niin jäännöskeskijahonnan perusteella lehdelliseen aineistoon tehty sovitus on hieman parempi. Yksiselitteisesti ei kuitenkaan voida mallien sovittamisen tulosten perusteella nimetä yhtä mallia paremmaksi, kuin toiset, sillä erot sovitusten välillä ovat hyvin pieniä.

Taulukko 3.5. Runkokäyrämallin sovituksen tulokset käytettäessä sovitusaineistona koko koepuuaineistoa. Stepwise = taaksepäin kulkevan regression valitsema optimaalinen parametrivalinta. R^2 = selitysaste, Adjusted R^2 = otoskoon suuruudella ja selittävien muuttujien lukumäärällä oikaistu selitysaste, P-arvo = kertoimien ja mallin tilastollinen merkitsevyys.

Aineisto (N=75)	Kaikki kertoimet		Stepwise	
	Kertoimet	P-arvo	Kertoimet	P-arvo
β_1	1,794	2,0E-16	1,803	2,0E-16
β_2	-3,422	3,4E-15	-3,500	2,0E-16
β_3	4,235	6,2E-12	4,404	2,0E-16
β_4	0,234	0,447	-	-
β_5	-3,930	2,8E-09	-3,686	2,0E-16
β_6	3,300	7,1E-10	3,125	2,0E-16
β_7	-1,190	1,6E-07	-1,105	4,6E-11
β_8	0,179	3,1E-04	0,158	2,7E-05
Jäännöskeskijahonta	0,0007147		0,000706	
R^2	1		1	
Adjusted R^2	1		1	
P-arvo	2,20E-16		2,20E-16	

Taulukko 3.6. Runkokäyrämallin sovituksen tulokset käytettäessä sovitusaineistona lehdettömään aikaan keilattuja koepuita. Stepwise = taaksepäin kulkevan regression valitsema optimaalinen parametrivalinta. R^2 = selitysaste, Adjusted R^2 = otoskoon suuruudella ja selittävien muuttujien lukumäärällä oikaistu selitysaste, P-arvo = kertoimien ja mallin tilastollinen merkitsevyys.

Aineisto (N=39)	Kaikki kertoimet		Stepwise	
	Kertoimet	P-arvo	Kertoimet	P-arvo
β_1	1,962	2,0E-16	1,952	2,0E-16
β_2	-5,931	6,3E-13	-5,839	2,0E-16
β_3	10,409	6,8E-12	10,183	2,0E-16
β_4	-7,961	1,93E-08	-7,584	1,2E-15
β_5	3,252	8,7E-04	2,770	5,0E-12
β_6	-0,745	0,23	-0,292	1,0E-05
β_7	0,300	0,37	-	-
β_8	-0,101	0,30	-	-
Jäännöskeskiahajonta	0,001768		0,001731	
R^2	1		1	
Adjusted R^2	1		1	
P-arvo	2,20E-16		2,20E-16	

Taulukko 3.7. Runkokäyrämallin sovituksen tulokset käytettäessä sovitusaineistona lehdelliseen aikaan keilattuja koepuita. Stepwise = taaksepäin kulkevan regression valitsema optimaalinen parametrivalinta. R^2 = selitysaste, Adjusted R^2 = otoskoon suuruudella ja selittävien muuttujien lukumäärällä oikaistu selitysaste, P-arvo = kertoimien ja mallin tilastollinen merkitsevyys.

Aineisto (N=36)	Kaikki kertoimet		Stepwise	
	Kertoimet	P-arvo	Kertoimet	P-arvo
β_1	1,611	2,0E-16	1,611	2,0E-16
β_2	-0,705	0,01	-0,705	0,01
β_3	-2,454	1,5E-04	-2,454	1,5E-04
β_4	9,112	6,34E-10	9,112	6,3E-10
β_5	-11,710	4,2E-11	-11,710	4,2E-11
β_6	7,682	3,38E-10	7,682	3,4E-10
β_7	-2,804	6,96E-08	-2,804	7,0E-08
β_8	0,482	4,13E-05	0,482	4,1E-05
Jäännöskeskiahajonta	0,001577		0,001577	
R^2	1		1	
Adjusted R^2	1		1	
P-arvo	2,20E-16		2,20E-16	

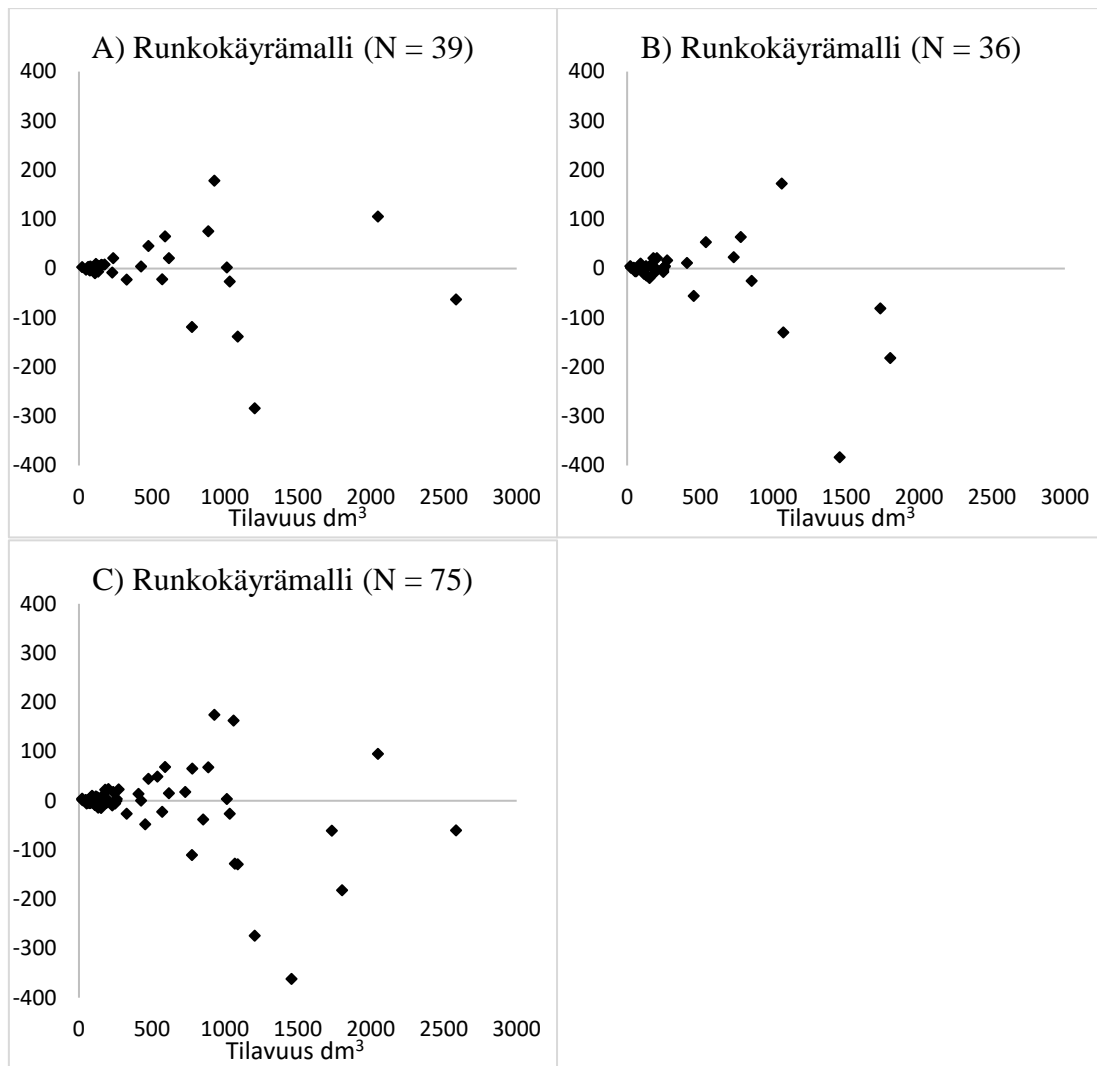
Runkokäyrämallien sovittamisen yhteydessä suoritettiin mallivaihtoehdoille ristiinvalidointi Leave-one-out -ristiinvalidointimenetelmää käyttämällä. Ristiinvalidoinnissa valittiin jokaisen aineistosovituksen osalta parhaat tuloksen antanut malli suhteessa inter-

poloiduista runkokäyristä laskettuihin tilavuuksiin. Tulokset ristiinvalidoinnista ovat esitetty taulukossa 3.8. Lehdettömään ajankohtaan tehdyn mallisovituksen voidaan tulosten perusteella nähdä toimineen parhaiten. Sitä vastaava tilavuusestimaatin tarkkuus RMSE:llä mitattuna oli 67,2 dm³ (15,2 %) ja harhalla -3,7 dm³ (-0,8 %). Heikoimmat tulokset saatiin lehdettömään aineistoon tehdyllä mallisovituksella, jossa RMSE oli 82,8 dm³ (20,9 %) ja harha -14,2 dm³ (-3,6 %). Vastaavasti koko aineistoon tehty sovitus antoi ristiinvalidoinnissa edellisten välille asettuneet tarkkuuden ja harhan arvot.

Taulukko 3.8. Tulokset runkokäyrämallien sovituksille tehdyistä ristiinvalidoinneista. Käytetty menetelmä oli Leave-one-out -ristiinvalidointi.

<i>Runkokäyrämalli</i>	<i>Lehdetön N=39</i>	<i>Lehdellinen N=36</i>	<i>Kaikki N=75</i>
<i>RMSE (dm³)</i>	67,2	82,8	71,7
<i>RMSE %</i>	15,2 %	20,9 %	17,0 %
<i>Harha (dm³)</i>	-3,7	-14,2	-8,2
<i>Harha %</i>	-0,8 %	-3,6 %	-1,9 %
<i>Keskivirhe (dm³)</i>	68,0	82,7	71,7
<i>Keskivirhe %</i>	15,3 %	20,9 %	17,0 %

Residuaalikuvaajat ovat piirretty ristiinvalidoinnissa saatujen tilavuusestimaattien ja todellisten interpoloiduista runkokäyristä laskettujen tilavuuksien eroista (kuva 3.2). Residuaalikuvien perusteella on hankala nähdä selkeitä eroja mallisovitusten väillä, koska havaintoja on aineistossa määrällisesti niin vähän. Lehdelliseen aineiston residuaalikuvassa voidaan kuitenkin erottaa hieman enemmän systemaattista yliarviota, kuin lehdelliseen aineistoon tehdyssä sovituksessa, jossa havainnot ovat tiiviimmin x-akselilla. Ero näyttäisi kuitenkin aiheutuneen yhdestä muista poikkeavasta havaintoarvosta, jossa mallin antama yliarvio on ollut muuta aineistoa suurempi.



Kuva 3.2. Lehmukselle sovitetun runkokäyrämallin ristiinvalidoinnin tuloksiin perustuvat residuaalikuvaajat. A) Lehdettömään aineistoon sovitettu runkokäyrämalli, B) Lehdelliseen aineistoon sovitettu runkokäyrämalli ja C) koko aineistoon sovitettu malli. Y-akselilla on laskettu ero todellisen tilavuuden ja ennustetun tilavuuden välillä (dm³).

Ristiinvalidoinnin tulosten perusteella lehdettömään aineistoon tehty mallisovitus antoi hieman paremmat tulokset kuin lehdelliseen ja koko aineistoon tehty sovitukset. Erot sovitusten välillä ovat kuitenkin mallin sovituksen tulosten, ristiinvalidoinnin ja residuaalikuvioiden perusteella pieniä. Lisäksi on huomioitava sovitukseen käytettyjen osa-aineistojen pieni koko, joka lisää riskiä poikkeavien havaintojen korostuneelle vaikutukselle mallien sovituksessa. Jos tarkastellaan ristiinvalidoinnin tuloksista muodostettuja residuaalikuvia, voidaan nähdä esimerkiksi lehdelliseen aineistoon tehdyn sovituksen saamat harhaisemmat tulokset olevan peräisin yksittäisestä poikkeavasta havainnosta, jossa oli 400 m³ yliarvio. Jos tämä havainto poistettaisiin mallin sovituksesta, saisi lehdelliseen aineistoon tehty sovitukset paremmat tarkkuutta kuvaavat tunnuslukujen arvot. Tästä syystä lopulliseksi

runkokäyrämallin sovituksi päädyttiin valitsemaan koko aineistoon tehty sovitus. Käytettäessä koko aineistoa yksittäisen poikkeavan havainnon rooli korostuu vähemmän, kuin pienemmän aineiston tapauksessa. Lopullisen mallin parametrit ovat esitetty taulukossa 3.9.

Taulukko 3.9. Lehmukselle sovitettun runkokäyrämallin lopulliset parametrit. Parametrit perustuvat koko koepuuaineistoon tehtyyn mallin sovitukseen.

<i>Runkokäyrämallin kertoimet</i>	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8
<i>Lehmus</i>	1,80348	-3,49978	4,40373	-	-3,68644	3,12534	-1,10523	0,15762

3.3 Tilavuusmallien sovittamisen tulokset

Kaikilla kolmella tilavuusmallilla tehtiin erilliset sovitukset lehdettömään, lehdelliseen ja koko aineistoon. Rinnankorkeusläpimittaan perustuvan mallin sovitusta kuvaavien tunnusluvut ovat esitetty taulukossa 3.10. Tulosten perusteella lehdettömään koepuuaineistoon sovitettu malli näyttäisi antavan tunnuslukujensa perusteella muita paremmat tulokset (taulukko 3.10). Erot mallinnusaineistojen välillä ovat kuitenkin hyvin pieniä, jos vertaillaan jäännöskeskiahjonnan tai selitysasteiden suuruutta. Selittävien muuttujien t-testillä laskettuja p-arvoja tarkasteltaessa kaikkien muiden paitsi lehdettömän aineiston tapauksessa kaikki kertoimia kuvaavat p-arvot ovat alle tilastollisen merkitsevyystason (0,05). Lehdettömään aineistoon tehdyssä sovituksessa X_1 -muuttujaa vastaavan β_1 kertoimen t-testillä laskettu p-arvo on suurempi, kuin tilastollisen merkitsevyystason taso. Merkitsevyyteen liittyen on esimerkiksi Ranta ym. (2012) kirjoittanut, ettei 0,05 riskisyysrajaa tule mieltää sellaiseksi, että muuttuja olisi samassa mallin kannalta yhdentekevä, kun tietty riskisyyden lukuarvoja ylitetään.

Taulukko 3.10. Rinnankorkeusläpimittaan pohjautuvan tilavuusmallin tunnusluvut eri sovitusaineistoissa R^2 = selitysaste, Adjusted R^2 = otoskoon suuruudella ja selittävien muuttujien lukumäärällä oikaistu selitysaste, P-arvo = kertoimien ja mallin tilastollinen merkitsevyys.

<i>f(dbh)</i>	<i>Lehdetön (N=39)</i>		<i>Lehdellinen (N=36)</i>		<i>Kaikki (N=75)</i>	
	<i>Kertoimet</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Kertoimet</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Kertoimet</i>	<i>P-arvo</i>
β_0	-4,884	1,91E-09	-4,884	1,79E-10	-4,850	2,00E-16
β_1	-0,011	0,136	-0,017	0,021	-0,014	0,008
β_2	3,045	2,91E-15	3,087	2,98E-16	3,053	2,00E-16
<i>Jäännöskeskihajonta</i>	0,1256		0,1328		0,1293	
<i>R²</i>	0,9889		0,988		0,988	
<i>Adjusted R²</i>	0,9883		0,9873		0,9876	
<i>P-arvo</i>	2,20E-16		2,20E-16		2,20E-16	

Tilavuusmallien sovituksissa parhaimpiin tuloksiin selitysasteen perusteella näytettäisiin tässä tutkimuksessa pääsevän rinnankorkeuteen ja pituuteen perustuvan tilavuusmallin tapauksessa (taulukko 3.11). Selitysaste on tulosten perusteella kaikkien mallinnusaineistojen tapauksessa hyvin lähellä teoreettista maksimiarvoaan (1). Myös jäännöskeskihajonnan perusteella mallin ennustavuus paranee noin 50 % taulukossa 3.10 esitettyyn rinnankorkeusläpimittaan perustuvaan tilavuusmalliin verrattuna. Mallin sovitusaineistoja vertaamalla nähdään, että parhaimmat sovitustulokset näyttäisivät antavan lehdettömään aikaan keilatut koepuut. Erot ovat kuitenkin sovitusaineistojen välillä hyvin pieniä. Eri aineistoihin sovitettujen mallien selittävien muuttujien kertoimia vastaavat p-arvot osoittavat kaikkien paitsi lehdellisen aineiston tapauksessa tilastollista merkitsevyyttä. Lehdellisessä sovitusaineistossa X_4 -muuttujaa vastaavan β_4 -kerroin saa t-testissä suuremman p-arvon kuin 0,05.

Taulukko 3.11. Rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen pohjautuvan tilavuusmallin tunnusluvut eri sovitusaineistoissa. R^2 = selitysaste, Adjusted R^2 = otoskoon suuruudella ja selittävien muuttujien lukumäärällä oikaistu selitysaste, P-arvo = kertoimien ja mallin tilastollinen merkitsevyys.

<i>f(dbh, h)</i>	<i>Lehdetön (N=39)</i>		<i>Lehdellinen (N=36)</i>		<i>Kaikki (N=75)</i>	
	<i>Kertoimet</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Kertoimet</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Kertoimet</i>	<i>P-arvo</i>
β_0	-6,374	5,39E-06	-5,117	2,35E-04	-5,658	2,37E-09
β_1	2,322	6,27E-13	2,307	1,95E-12	2,303	2,00E-16
β_2	7,552	0,001	5,205	0,03	6,253	7,72E-05
β_3	-5,917	0,003	-3,999	0,05	-4,858	4,36E-04
β_4	-0,014	0,046	-0,010	0,119	-0,011	0,015
Jäännöskeskijajonta	0,07377		0,08849		0,07977	
R^2	0,9964		0,995		0,9956	
Adjusted R^2	0,996		0,9944		0,9953	
P-arvo	2,20E-16		2,20E-16		2,20E-16	

Rinnankorkeusläpimittaan, pituuteen ja yläläpimittaan pohjautuvan tilavuusmallin sovitus tulokset osoittavat korkeimman selitysasteen arvon tulevan lehdettömään aineistoon tehdystä sovituksista (taulukko 3.12). Tilastollinen merkitsevyysraja (0,05) ylittyy kaikkien kolmen sovitusaineistojen tapauksessa vähintään kolmen selittävän muuttujan osalta. Jäännöskeskijajonnan perusteella paras mallin sovitus saadaan lehdettömään aineistoon tehdystä sovituksista. Erot sovitusvälikillä ovat kuitenkin mallien välillä hyvin pieniä.

Taulukko 3.12. Rinnankorkeusläpimittaan, pituuteen ja yläläpimittaan pohjautuvan tilavuusmallin tunnusluvut eri sovitusaineistoissa. R^2 = selitysaste, Adjusted R^2 = otoskoon suuruudella ja selittävien muuttujien lukumäärällä oikaistu selitysaste, P-arvo = kertoimien ja mallin tilastollinen merkitsevyys.

<i>f(dbh, h, d6)</i>	<i>Lehdetön (N=39)</i>		<i>Lehdellinen (N=36)</i>		<i>Kaikki (N=75)</i>	
	<i>Kertoimet</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Kertoimet</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Kertoimet</i>	<i>P-arvo</i>
β_0	0,3259	0,065	0,2374	0,189	0,2725	0,019
β_1	-0,0001	0,867	0,0000	0,969	-0,0001	0,882
β_2	-0,0160	0,072	-0,0094	0,309	-0,0117	0,051
β_3	1,1246	3,65E-04	1,4689	0,002	1,3165	1,22E-06
β_4	0,7180	0,241	0,6884	0,190	0,6987	0,053
β_5	0,6011	1,76E-04	0,4825	0,007	0,5147	2,97E-06
Jäännöskeskijajonta	0,01669		0,02804		0,02232	
R^2	0,895		0,820		0,844	
Adjusted R^2	0,879		0,790		0,832	
P-arvo	3,24E-15		2,58E-10		2,20E-16	

Tilavuusmallien sovittamisen yhteydessä suoritettiin ristiinvalidointi Leave-one-out -ristiinvalidointimenetelmää käyttämällä. Tilavuusmallikohtaiset tulokset ristiinvalidoinnista on esitetty taulukoissa 3.13, 3.14 ja 3.15. Rinnankorkeusläpimittaan perustuvan tilavuusmallin tulosten perusteella sovitusaineistojen välillä ei ole havaittavissa suuria eroja (taulukko 3.13). Jos tarkastellaan tunnuslukujen suhteellisia arvoja eri sovitusaineistojen välillä, niin parhaat arvot vaikuttaisivat olevan lehdettömään aineistoon sovitetulla mallilla RMSE:llä (23,2 %) ja keskivirheellä (23,4 %) mitattuna. Systemaattinen virhe oli harhalla mitattuna alhaisin koko aineistoon sovitetulla mallilla (-0,1 %).

Taulukko 3.13. Tulokset ristiinvalidoinnista rinnankorkeusläpimittaan perustuvan tilavuusmallin osalta.

<i>f(dbh)</i>	<i>Lehdetön N=39</i>	<i>Lehdellinen N=36</i>	<i>Kaikki N=75</i>
<i>RMSE (dm³)</i>	102,6	102,0	114,2
<i>RMSE %</i>	23,2 %	25,7 %	27,1 %
<i>Harha (dm³)</i>	2,6	-4,6	-0,6
<i>Harha %</i>	0,6 %	-1,2 %	-0,1 %
<i>Keskivirhe (dm³)</i>	103,9	107,5	115,0
<i>Keskivirhe %</i>	23,4 %	27,1 %	27,3 %
<i>R²</i>	0,986	0,985	0,995

Rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuvan tilavuusmallin osalta ristiinvalidoinnin tulokset ovat esitetty taulukossa 3.14. Tulosten perusteella nähdään, ettei aineistojen välillä ole järisyttävän suuria eroja keskenään tarkkuuksia verrattaessa myöskään tämän mallin tapauksessa. Suhteellisia tunnuslukuja vertaamalla nähdään parhaimpien arvojen tulleen koko aineistoon tehdystä sovituksesta, jossa RMSE (16,7 %), harha (-0,1 %) ja keskivirhe (16,8 %) olivat alhaisimmat.

Taulukko 3.14. Tulokset ristiinvalidoinnista rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuvan tilavuusmallin osalta.

<i>f</i> (dbh, h)	<i>Lehdetön N=39</i>	<i>Lehdellinen N=36</i>	<i>Kaikki N=75</i>
RMSE (dm³)	82,8	68,5	70,1
RMSE %	18,7 %	17,3 %	16,7 %
Harha (dm³)	4,3	-5,1	-0,4
Harha %	1,0 %	-1,3 %	-0,1 %
Keskivirhe (dm³)	83,8	72,1	70,6
Keskivirhe %	18,9 %	18,2 %	16,8 %
R²	0,995	0,992	0,995

Rinnankorkeusläpimittaan, pituuteen ja yläläpimittaan perustuvan tilavuusmallia koskevat ristiinvalidointitulokset ovat taulukossa 3.15. Kuten kahden tunnuksen tilavuusmallissa, niin myös kolmen tunnuksen tilavuusmallissa tulokset osoittavat koko aineistoon tehdyn sovituksen toimineen parhaiten tunnuslukujen perusteella. Erot aineistojen välillä ovat tämänkin ristiinvalidoinnin osalta hyvin marginaaliset. Koko aineistoon sovitettu malli antoi suhteellisilla tunnusluvuilla RMSE:n arvoksi 7,5 %, harhaksi -0,1 % ja keski-
virheeksi 7,5 %.

Taulukko 3.15. Tulokset ristiinvalidoinnista rinnankorkeusläpimittaan, pituuteen ja yläläpimittaan perustuvan tilavuusmallin osalta.

<i>f</i> (dbh, h, d ₆)	<i>Lehdetön N=39</i>	<i>Lehdellinen N=36</i>	<i>Kaikki N=75</i>
RMSE (dm³)	33,8	35,3	31,5
RMSE %	7,6 %	8,9 %	7,5 %
Harha (dm³)	1,2	-2,6	-0,1
Harha %	0,3 %	-0,7 %	0,0 %
Keskivirhe (dm³)	34,2	37,2	31,7
Keskivirhe %	7,7 %	9,4 %	7,5 %
R²	0,830	0,680	0,680

Tilavuusmallien sovittamisen ja ristiinvalidoinnin jälkeen valittiin parhaat mallin sovituks² perustuen ristiinvalidoinneista saatuihin tuloksiin. Erot sovitus²ten välillä eivät ol-

leet kovin suuria, mutta tästä huolimatta lopullisiksi mallien sovituksiksi valittiin ristiivaldoinnissa parhaat arvot saaneet mallit. Yhden tunnuksen tilavuusmalli pohjautuu lehdeettömään koepuuaineistoon. Kahden ja kolmen tunnuksen tilavuusmallit perustuvat koko aineistoon tehtyyn mallien sovitukseen. Kaavat 3.1, 3.2 ja 3.3 esittävät lopullisia tilavuusyhtälöitä, kun niihin tehdyt muunnokset ovat purettu ja mallit ovat samassa muodossa, kuin Laasasenahon (1982) tilavuusmallit yleisesti esitetään.

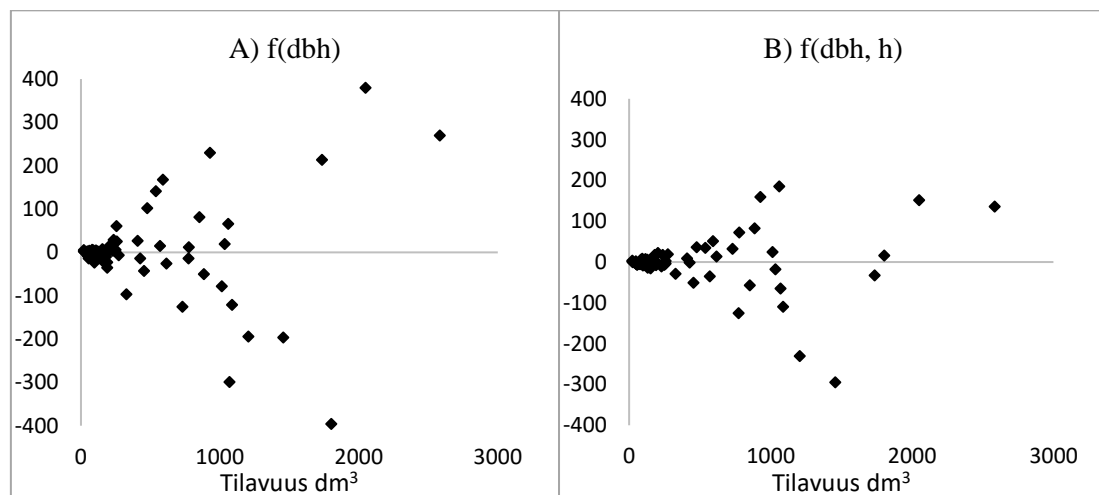
$$f(dbh): \ln(v_{Lehmus}) = -4,87642 - 0,011404 \ln(2 + 1,25dbh) + 3,045266 dbh \quad (3.1)$$

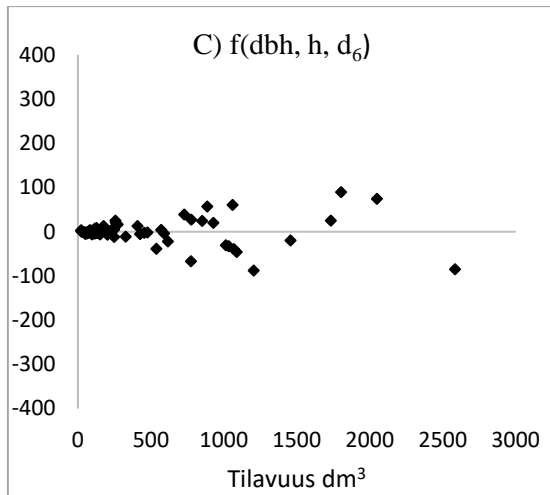
$$f(dbh, h): v_{Lehmus} = 0,003502 dbh^{2,303079} (0,98911)^{dbh} h^{6,253428} (h - 1,3)^{-4,857799} \quad (3.2)$$

$$f(dbh, h, d_6): v_{Lehmus} = 0,1033996 dbh^2 + 0,0214026 dbh^2 h - 0,000005335 dbh^3 h - 0,000915557 dbh^2 h^2 + 0,054875942 (dbh^2 + dbh d_6 + d_6^2) + 0,0404217 d_6^2 (h - 6,0) \quad (3.3)$$

missä: v = puun tilavuus (dm^3)
 dbh = läpimitta rinnankorkeudella 1,3m (cm)
 d_6 = läpimitta 6 metrin korkeudella (cm)
 h = puun pituus (m)

Kuvassa 3.3 on esitetty lehmukselle sovitettujen tilavuusmallien residuaalikuvat koko aineistolla. Kuvaajissa y-akselin skaalaus on vakioitu, joten kuvaajista voidaan helposti nähdä mallien tarkkuudet toisiinsa verrattuna. Eniten hajontaa tilavuusennusteissa on rinnankorkeusläpimittaan perustuvassa mallissa. Kun tunnuksia lisätään malliin niin mallin tarkkuudet parantuvat. Vähiten hajontaa tilavuusennusteissa on selvästi kolmen tunnuksen tilavuusmallissa.





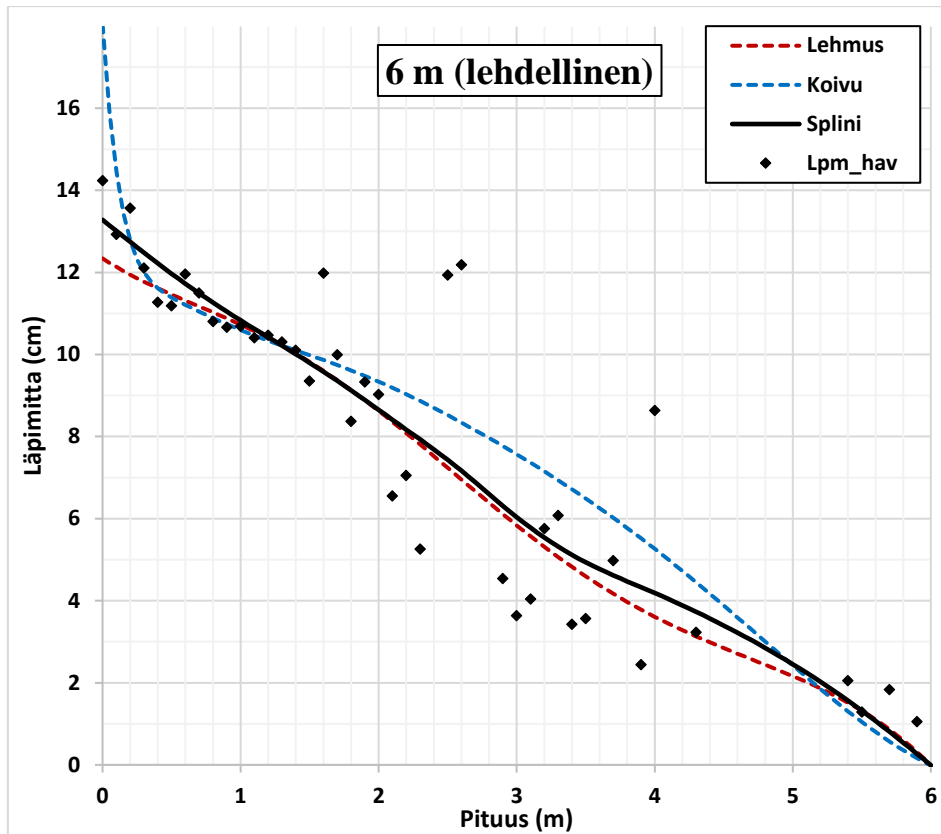
Kuva 3.3. Lehmukselle sovitettujen tilavuusmallien residuaalikuvat. A) Rinnankorkeusläpimittaan perustuva tilavuusmalli, B) Rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuva tilavuusmalli ja C) Rinnankorkeusläpimittaan, pituuteen ja yläläpimittaan perustuva tilavuusmalli. Y-akselilla on laskettu ero todellisen tilavuuden ja ennustetun tilavuuden välillä (dm^3).

3.4 Lehmukselle sovitettujen mallien vertailu koivun malleihin

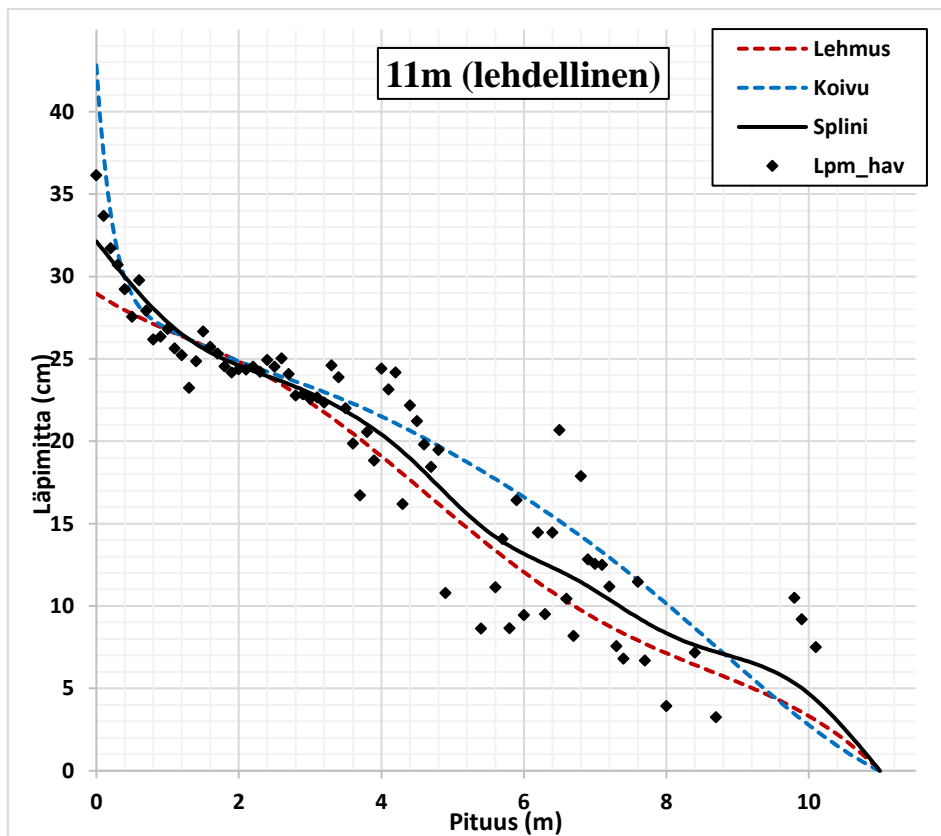
Runkokäyrämalli

Lehmukselle sovitettuja runkokäyrämalleja vertailtiin Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämalliin visuaalisesti neljällä eri kokoisella ja eri ajankohtaan keilatulla koepuulla. Kuvissa 3.4, 3.5, 3.6 ja 3.7 lehmukselle sovitettu runkokäyrä on esitetty punaisella katkoviivalla ja Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämalli sinisellä katkoviivalla. Näiden lisäksi kuvaajissa on interpolointia edeltävät läpimittahavainnot, sekä niistä interpoloitu runkokäyrä mustalla yhtenäisellä viivalla.

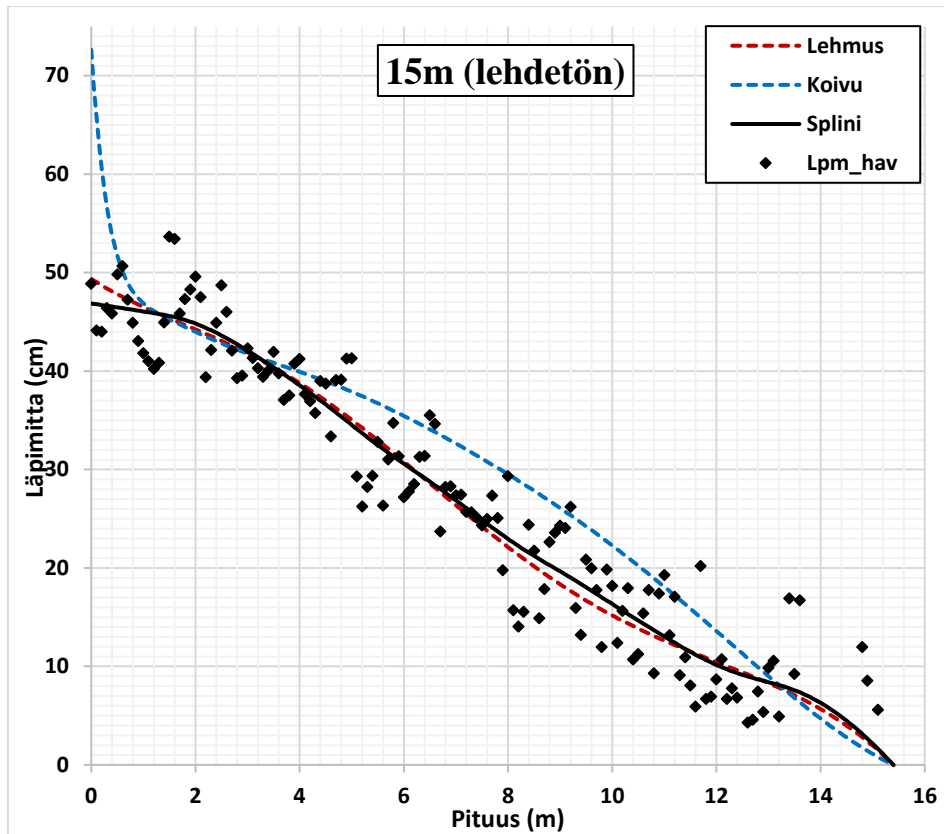
Suurimmat erot koivun ja lehmuksen runkokäyrämalleissa on havaittavissa mallien käyttäytymisessä puun tyvellä ja noin 50-60 % korkeudella puun runkoa. Näissä kohdin Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämalli antaa selvästi suurempia läpimittahavaintoja, kuin lehmukselle sovitettu runkokäyrämalli. Jos verrataan lehmuksen runkokäyrämallin sovituksen onnistumista suhteessa koepuiden todelliseen runkokäyrään, niin malli sovitetaan siihen hyvin riippumatta puiden koosta (kuvat 3.4, 3.5, 3.6 ja 3.7).



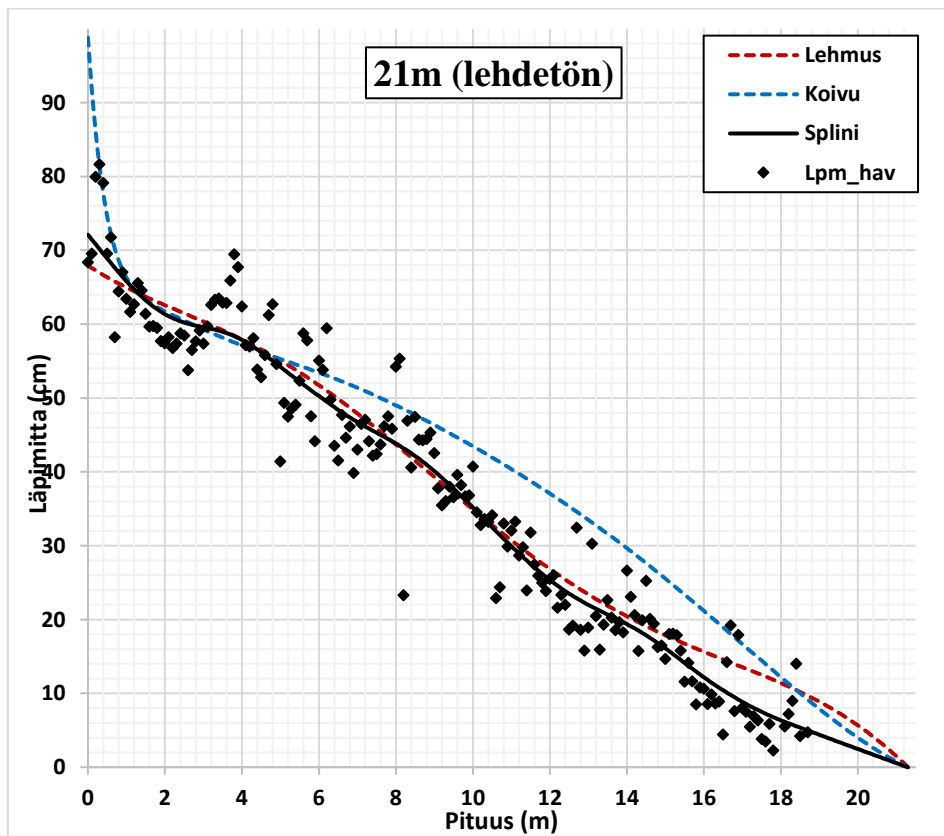
Kuva 3.4. Lehdelliseen aikaan mitattu 6 metrin pituinen koepuu.



Kuva 3.5. Lehdelliseen aikaan mitattu 11 metrin pituinen koepuu.



Kuva 3.6. Lehdettömään aikaan mitattu 15 metrin pituinen koepuu.



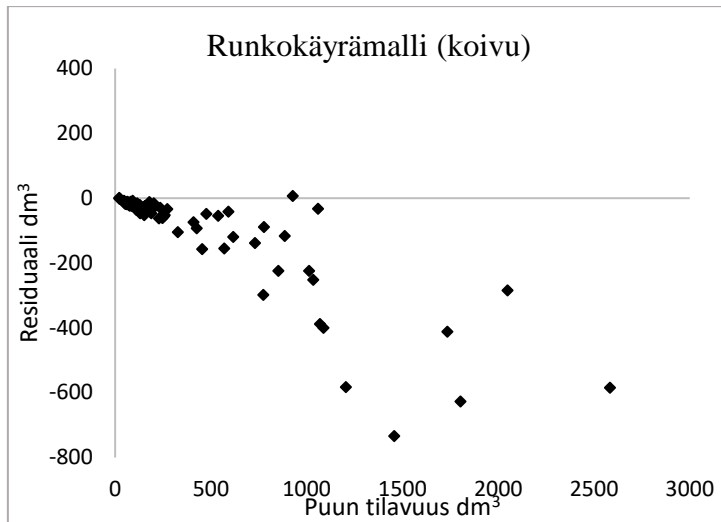
Kuva 3.7. Lehdettömään aikaan mitattu 21 metrin pituinen koepuu.

Lehmukselle sovitetun runkokäyrämallin hyvyyttä testattiin laskemalla koepuille kontrollitilavuudet Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämallin avulla. Kontrollitilavuuksia verrattiin interpoloiduista runkokäyrästä laskettuihin tilavuuksiin. Taulukossa 3.16 on esitetty näiden tilavuuksien erosta lasketut RMSE:tä ja harhaa kuvaavat tunnusluvut. Koivun runkokäyrämalli antoi keskimäärin noin 100 litran suuruisia yliarvioita lehmusten tilavuuksien suhteen. Myös sen suhteellinen harha on tulosten mukaan noin -24 %, kun se lehmukselle sovitetuissa malleissa saatiin sovituksen kautta laskettua lähelle nollaa. Lehdellisen ja lehdettömän aineiston välillä ei juurikaan ole havaittavissa eroja tilavuusennusteiden tarkkuuksien suhteen koivun runkokäyrämallin tuloksissa.

Runkokäyrämallin tarkkuutta kuvaava RMSE on koivun mallilla ennustettaessa suhteellisesti noin 44 % verrattuna koepuuaineiston keskitilavuuteen (taulukko 3.16). Lehmukselle sovitettu malli antoi noin puolet tätä parempia tuloksia. Joskin täytyy huomioda, että systemaattinen virhekomponentti luultavasti aiheuttaa suurimman osan tästä malleilla laskettujen tilavuusennusteiden erosta. Kuvassa 3.8 on lisäksi muodostettu koivun runkokäyrämallilla ennustetuista tilavuuksista residuaalikuvaaja, joka havainnollistaa tilavuuden estimaatissa olevaa virhettä eri kokoisilla puilla.

Taulukko 3.16. Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämallilla laskettujen tilavuuksien erot interpoloidusta runkokäyrästä laskettuun tilavuuteen.

<i>Koivun malli</i>	<i>Lehdetön</i>	<i>Lehdellinen</i>	<i>Kaikki</i>
<i>Harha dm³</i>	-100	-101,2	-100,3
<i>Harha %</i>	-22,60 %	-25,50 %	-23,80 %
<i>RMSE dm³</i>	176,9	196,7	186,7
<i>RMSE %</i>	39,90 %	49,60 %	44,40 %



Kuva 3.8. Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämallin ja todellisten mitattujen tilavuuksia vastaava residuaalikuva. Residuaalit ovat laskettu todellisten ja ennustettujen tilavuuksien erotuksesta.

Studentin yksisuuntaisella parittaisella t-testillä laskettiin tilastollinen merkitsevyys Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämallin ja lehmukselle sovitetun runkokäyrämallin tarkkuuksien erolle. Testi suoritettiin malleilla laskettujen tilavuuksien ja todellisten tilavuuksien eron itseisarvosta. Testin nollahypoteesi oletti erojen olevan samansuuruiset mallien välillä. T-testistä saatiin p-arvoksi 2,24E-06, joka on alle 0,05 ja siksi nollahypoteesi hylätään. Testi osoittaa, että sovittamalla runkokäyrämalli lehmukselle saatiin tilavuusestimaatin tarkkuutta parannettua tilastollisesti merkitsevällä tasolla.

Tilavuusmallit

Laasasenahon (1982) koivun tilavuusmalleilla ennustettiin koepuille tilavuudet ja malleista saatuja tilavuuksia verrattiin interpoloiduista runkokäyrästä laskettuihin runkotilavuuksiin. Tilavuuksien eroista laskettiin harhaa ja RMSE:tä kuvaavat tunnusluvut, jotka ovat esitetty taulukossa 3.17. Rinnankorkeusläpimittaan perustuvan tilavuusmallin osalta tulokset osoittavat selkeää systemaattista virhettä, jonka takia malli aliarvioi ennustettavien puiden tilavuutta keskimäärin noin 200 dm³. Suhteutettuna koepuuaineiston keski kokoon harhan suuruus on noin 49 %. Systemaattinen virhe osaltaan myös nostaa RMSE:n arvon korkealle.

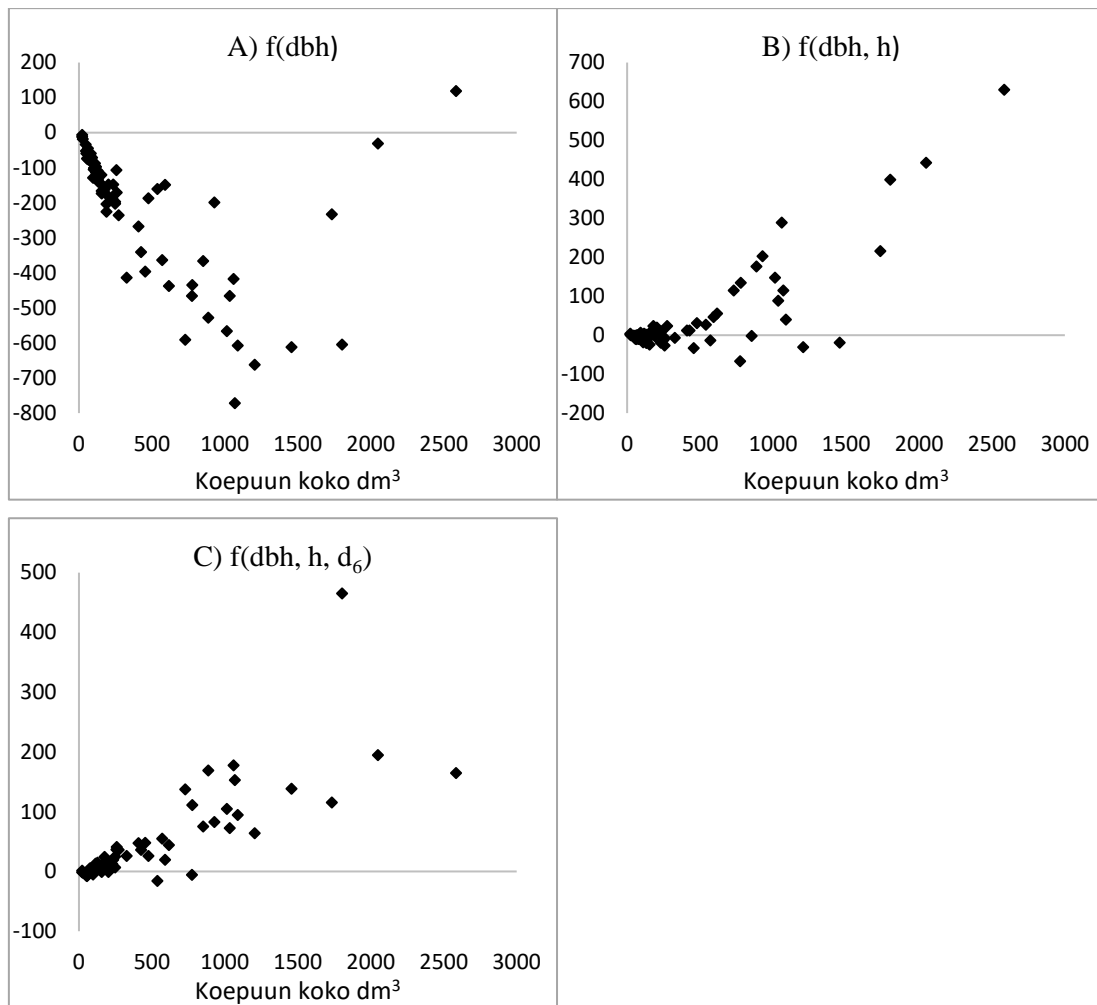
Kahden ja kolmen tunnuksen tilavuusmallit eivät sen sijaan sisällä läheskään yhtä paljon systemaattista virhettä, kuin rinnankorkeusläpimittaan perustuva tilavuusmalli. Lisätun-

nusten sisällyttäminen malliin tekee malleista vähemmän herkän systemaattiselle virheelle. Harhan suuruudet litramääräisinä kahden ja kolmen tunnuksen tilavuusmalleissa olivat noin 40 dm³ ja suhteutettuna populaation keskokokoon 10 %. RMSE:llä mitattuna tarkkuudet olivat 120 dm³ (28 %) kahden tunnuksen mallissa ja 40 dm³ (20 %) kolmen tunnuksen mallissa (taulukko 3.17).

Taulukko 3.17. Laasasenahon (1982) koivun tilavuusmallien tarkkuudet verrattuna koipuista mitattuihin tilavuuksiin

<i>f(dbh)</i>	<i>Lehdetön</i>	<i>Lehdellinen</i>	<i>Kaikki</i>
<i>Harha dm³</i>	-199,7	-199,4	-207,5
<i>Harha %</i>	-45,1 %	-54,5 %	-49,3 %
<i>RMSE dm³</i>	270,8	285,9	278,2
<i>RMSE %</i>	61,1 %	72,1 %	66,1 %
<i>f(dbh, h)</i>	<i>Lehdetön</i>	<i>Lehdellinen</i>	<i>Kaikki</i>
<i>Harha dm³</i>	42,2	30,4	37,7
<i>Harha %</i>	9,5 %	8,3 %	9,0 %
<i>RMSE dm³</i>	134,9	97,2	118,3
<i>RMSE %</i>	30,4 %	24,5 %	28,1 %
<i>f(dbh, h, d_e)</i>	<i>Lehdetön</i>	<i>Lehdellinen</i>	<i>Kaikki</i>
<i>Harha dm³</i>	32,7	42,5	39,1
<i>Harha %</i>	7,4 %	11,6 %	9,3 %
<i>RMSE dm³</i>	59,9	98,8	80,9
<i>RMSE %</i>	13,5 %	24,9 %	19,2 %

Kuvassa 3.9 piirretty todellisista ja ennustetuista tilavuuksista residuaalikuvaajat, joista voidaan tarkastella todellisten tilavuuksien ja ennustettujen tilavuuksien välistä eroa. Yhden tunnusluvun mallissa, eli ainoastaan rinnankorkeusläpimittaan perustuvassa mallissa on havaittavissa runsaasti systemaattista virhettä, jonka seurauksesta rinnankorkeusläpimittaan perustuva tilavuusmalli yliarvioi tilavuusennusteita läpi koko aineiston. Tilavuusennusteissa oleva systemaattinen virhe kasvaa tilavuuden kasvaessa selvimmin rinnankorkeusläpimittaan perustuvassa mallissa. Laasasenahon (1982) kahden ja kolmen selittävän muuttujan mallit sopivat lähtökohtaisesti aineistoon paremmin, mutta niissäkin on havaittavissa systemaattista virhettä, jonka seurauksesta mallit aliarvioivat todellista tilavuutta. Kaikissa malleissa tilavuusennusteissa oleva virhe kasvaa koepuun tilavuuden kasvaessa.



Kuva 3.9. Laasasenahon (1982) koivun tilavuusmalleilla lasketut tilavuudet ja niitä vastaavat residuaalit suhteessa todellisiin tilavuuksiin koko aineistolla. A) Rinnankorkeusläpimittaan perustuva tilavuusmalli, B) Rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuva tilavuusmalli ja C) Rinnankorkeusläpimittaan, pituuteen ja yläläpimittaan perustuva tilavuusmalli. Y-akselilla on laskettu erotus todellisten tilavuuksien ja koivun tilavuusmalleilla ennustettujen välillä.

Lopuksi lehmukselle sovitettujen tilavuusmallien tarkkuuksia verrattiin koivun tilavuusmalleihin Studentin yksisuuntaisen parittaisen t-testin avulla. T-testi tehtiin tilavuusennusteiden ja todellisten tilavuuksien erotuksesta, jotka oltiin ennen testiä muunnettu itseisarvoiksi. T-testin tulosten perusteella yhden selittävän muuttujan mallille saatiin p-arvoksi $2,62E-12$, kahden selittävän muuttujan mallille $0,071$ ja kolmen selittävän muuttujan mallille $9,91E-05$. P-arvojen perusteella voidaan todeta yhden ja kolmen selittävän muuttujan mallin osalta lehmukselle sovitettujen mallien parantaneen tilavuusestimaatin

tarkkuutta tilastollisesti merkitsevällä tasolla. Kahden selittävän muuttujan mallin tapauksessa t-testissä saatu p-arvo oli yli 0,05, jonka perusteella tarkkuuden parantuminen ei ollut tilastollisesti merkitsevä.

4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Koepuuaineiston ja referenssirunkokäyrien luotettavuuteen vaikuttavat tekijät

Tutkimuksessa käytettävän koepuuaineiston valinnassa käytettyä otantaa voidaan pitää luotettavana ja sillä hankittua koepuuaineistoa laadukkaana mallintamisen näkökulmasta. Katupuurekisteri tarjosi otannan pohjaksi ideaaliset lähtökohdat, sillä sen avulla koepuuaineistoon voitiin sisällyttää koko populaatiossa ollut vaihtelu katupuiden koon suhteen. Alle 10 cm kokoisten puiden poissulkeminen otantaa edeltävästä populaatiosta mahdollisti resurssien optimaalisemman kohdistamisen tilavuudeltaan suurempiin puihin. Vaikka otanta suoritettiin systemaattisena, voidaan aineistoon sisällytettyjen puiden todeta tulleen valituksi satunnaisesti, sillä puiden järjestys puurekisterissä satunnaistettiin otantaa edeltävästi. Valittujen koepuiden voidaan lisäksi todeta tulleen valituksi maantieteellisestä näkökulmasta satunnaisesti noudattaen katupuupopulaation todellisia esiintymistiheyksiä Helsingin kaupungin alueella (kuva 2.2).

Otantavirheen näkökulmasta yhtenä riskinä otannan virheellisyydestä voidaan nähdä olevan otannan pohjalla käytetyt puurekisterin puukohtaiset läpimitat. Nämä läpimitat eivät olleet maastossa suoraan puista mitattuja, vaan ne ovat aikaisemmin mallinnettu lentolaserkeilaukseen perustuvasti puiden pituuksien kautta (Tanhuanpää ym. 2014). Tästä syystä läpimitat sisältävät jossain määrin mallinnusvirhettä, joka saattoi alentaa otannan laatua. Otanta olisi ollut tästä syystä perustellumpaa tehdä puurekisterin pituustietoihin pohjautuen, sillä ne eivät sisältäneet mallinnuksen kautta tullutta virhettä. Tanhuanpään ym. (2014) mukaan puiden pituuksien tarkkuus oli 1,28 metriä (RMSE) ja läpimittojen keskimäärin 6,9cm (RMSE). Vaikka otanta tehtiin läpimittavälejä käyttämällä, niin osa-aineistot olivat tästä huolimatta rakenteeltaan lähes identtiset (kuva 2.5). Myös keskiläpimittojen, keskipituuksien, sekä minimi- ja maksimitunnusten perusteella osa-aineistot ovat hyvin lähellä toisiaan. (taulukko 2.8).

Yhtenä tavoitteena tässä tutkimuksessa oli selvittää kahteen eri ajankohtaan keilattujen koepuuaineistojen hyvyttä runkokäyrien erottamisen suhteen ja sitä kautta tilavuuksien ja mallien laadinnassa. Tutkimuksessa saadut tulokset osoittavat, että ajankohtien välillä oli havaittavissa selkeitä eroja varsinkin läpimittojen mittaustuloksissa pistepilvestä (kuva 3.1). Erot ajankohtien välillä olivat niin selkeät, että vaikka kahteen eri ajankohtaan keilattu aineisto ei sisältänyt samoja koepuita kesällä ja talvella, niin erot tuloksissa ovat

siitä huolimatta havaittavissa. Jotta ajankohtien erot olisivat vielä yksiselitteisemmin erotettavissa olisi keilattujen puiden tulleet olla samat kesällä ja talvella. Tämä olisi tullut ottaa paremmin huomioon tämän tutkimuksen koepuuaineistoa koostettaessa. Olemassa olevan aineiston valintaan vaikuttivat kuitenkin ensisijaisesti resurssien rajallisuus ja tavoite tutkia aineistoa myös kokonaisuutena malien sovittamisessa.

Tässä tutkimuksessa suurimmat oletukset ja tulosten yleistettävyyden kannalta haastavimmat tulkinnat ovat tehty pistepilvistä estimoitujen runkokäyrien tapauksessa. Interpoloitujen runkokäyrien oletetaan olevan absoluuttiset, eli vastaavan puiden todellista runkokäyrää maastossa. Tämä oletus jouduttiin tekemään, koska mahdollisuutta perinteisten runkoanalyysien tekoon koepuista ei ollut. Aikaisempaa tutkimusta tämän oletuksen perusteluksi on kuitenkin olemassa ja sen pohjalta tiedetään runkokäyrän mittaustarkkuuden olevan tilavuudella mitattuna (RMSE) jopa alle 30 dm³ (Liang ym. 2014; Astrup ym. 2014; Saarinen ym. 2017). Suhteellisesti esimerkiksi Saarisella ym. (2017) tilavuusestimaatin tarkkuus oli RMSE:llä mitattuna noin 3,1 % suhteutettuna populaation keskitilavuuteen. Lehmusten keskitilavuuteen (420 dm³) suhteutettuna virheen määrä olisi siten noin 13 dm³, mikä ei ole paljon. Tästä huolimatta kyseessä on kuitenkin selkeästi tämän tutkimuksen heikoin kohta, koska todellista tilavuutta ei ole koepuista ollut mahdollista validoida. Erilaiset tekijät, kuten eri puulaji ja kasvupaikka voivat vaikuttaa tilavuusestimaattien luotettavuuteen.

Eräänä tutkimuksen tuloksiin vaikuttavana tekijänä saattaa lisäksi olla aineiston keräämisessä käytetty keilausetäisyys. Tässä tutkimuksessa koepuuaineiston keilaaminen pyrittiin tekemään etäisyydeltä, joka vastasi 50 % keilattavan puun pituudesta. Saarisen ym. (2017) tutkimuksessa havaittiin optimaalisimman keilausetäisyyden olevan välillä 25-50 % puun pituudesta. Keilausetäisyyden kasvattaminen 50 % etäisyydeltä 75 % etäisyydelle vaikutti saatujen läpimittahavaintojen määrään vähentämällä sitä 15-20 %. Tässä tutkimuksessa koepuiden keilausten yhteydessä tavoiteltiin myös 50 % keilausetäisyyttä käyttäen esikuvana Saarisen ym. (2017) tutkimusta.

Lehdettömät koepuut onnistuttiin keilaamaan kaikki keskimäärin 50 % etäisyydeltä puun pituudesta. Lehdelliseen aikaan kuitenkin kahdesta puukohtaisesta keilauksesta ensimmäiset tehtiin keskimäärin 50 % etäisyydeltä ja jälkimmäiset taas 70 % etäisyydeltä. Täyttä varmuutta jälkimmäisen keilauksen etäisyyden aiheuttamista laatuvaikutuksista aineistolle ei ole. Keilausten välituloksista laskettiin, että ensimmäisessä keilauksessa

saatiin keskimäärin 59 % saatavilla olevista läpimitoista ja toisessa keilauksessa keskimäärin 55 %. Etäisyyden kasvamisen aiheuttama vaikutus mitattujen läpimittojen määrään oli siten lehmusten tapauksessa keskimäärin noin 6-7 %. Tutkimuksen välivaiheissa keilaukset yhdistettiin ennen lopullisten runkokäyrien interpolointia ja tilavuuksien laskentaa, mikä todennäköisesti osaltaan kompensoi mahdollista laatuhaittaa.

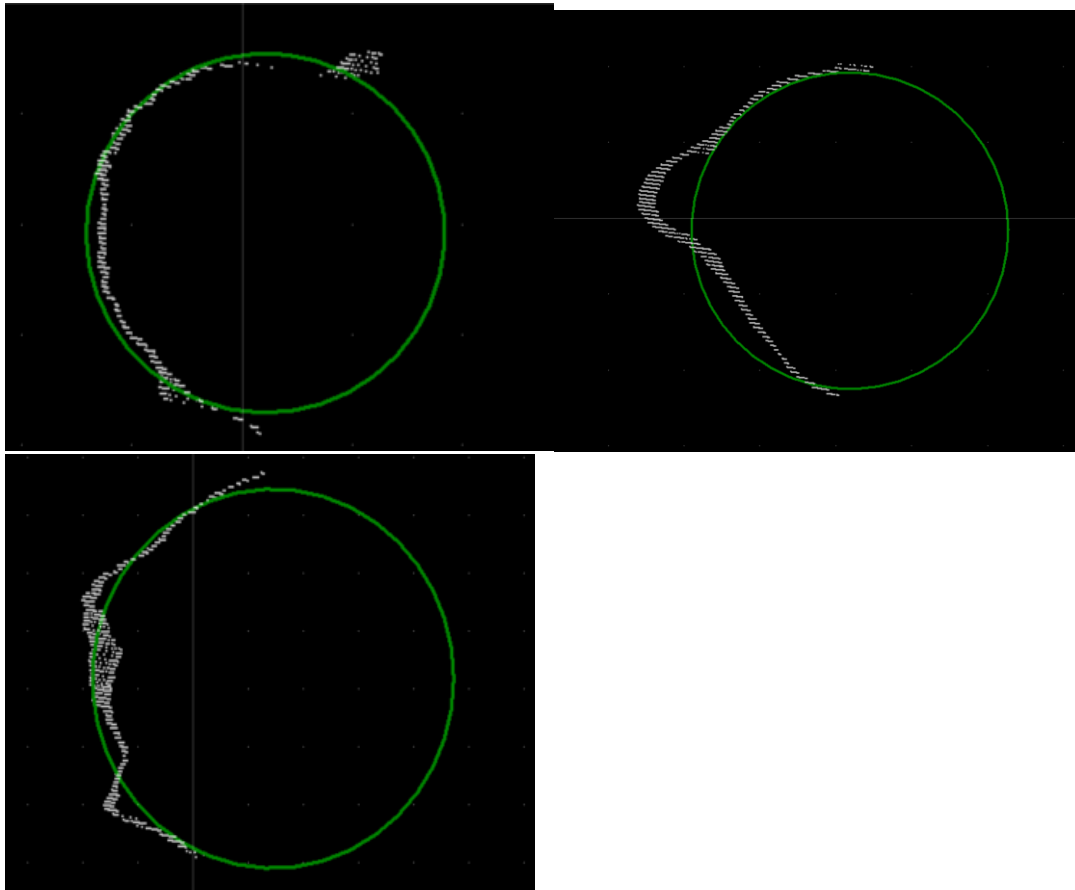
4.2 Pistepilvestä mitatut läpimitat ja pituudet

Tässä tutkimuksessa rinnankorkeusläpimitan tarkkuudeksi pistepilvestä saatiin RMSE:llä mitattuna 2,4 cm ja harhan suhteen keskimäärin noin 1,1 cm verran yliarvioita. Tulokset vastaavat melko hyvin aikaisemmissa tutkimuksissa esitettyjä läpimitan mittaustarkkuuksia. Esimerkiksi Maas ym. (2008) ja Tansey ym. (2009) raportoivat RMSE:llä mitattuna myös alle 5 cm tarkkuuksia. Suomessa männyllä ja kuusilla on tosin raportoitu jopa alle 1,5 cm tarkkuuksia läpimitan mittaustarkkuudessa (kts. Liang ym. 2012; Kankare ym. 2013; Kankare ym. 2014; Liang ym. 2014; Kankare ym. 2015; Saarinen ym. 2017).

Eri tutkimuksissa käytetyt koepuuaineistot eivät välttämättä ole rakenteeltaan yhtenäisiä keskenään ja sen vuoksi absoluuttisilla tarkkuusarvoilla tehty vertailu ei välttämättä tarjoa suoraan vertailukelpoisia tunnuslukuja tutkimusten välillä. Lehmusaineistossa koepuuaineiston rinnankorkeusläpimitat olivat keskimäärin noin 28 cm, toisin kuin monessa muussa tutkimuksessa, joissa aineiston puut ovat läpimitan suhteen keskimäärin pienempiä. Esimerkiksi Kankareen ym. (2013) aineistossa keskiläpimita oli noin 21 cm ja Saarisen ym. (2017) aineistossa 20 cm. Suhteelliset tunnusluvut antavat vertailua varten paremmat lähtökohdat, sillä niissä puiden läpimitan mittaustarkkuus on suhteutettu populaation keskiläpimitaan. Tässä tutkimuksessa suhteellinen harha rinnankorkeusläpimitan mittauksessa oli keskimäärin -4,0 % ja vastaavasti RMSE 8,8 %. Esimerkiksi Kankare ym. (2013) sai vastaaviksi tunnusluvuiksi -3,36 % ja 7,06 %, Kankare ym. (2014) 2,1 % ja 5,8 %, Liang ym. (2014) 0,3 % ja 4,21 % ja Kankare ym. (2015) 0,2 % ja 7,2 %. Verrattuna näihin aikaisempiin tutkimuksiin voidaan todeta mittaustarkkuuden olleen tässä tutkimuksessa lähes samalla tasolla kuin aikaisemmissa tutkimuksissa.

Lehmusten kasvatavalla ja kasvuolosuhteilla on kuitenkin vaikutusta runkomuotoon ja sitä kautta rungon poikkileikkauksen pyöreyyteen. Esimerkiksi Saarinen ym. (2014) on havainnut puisto-olosuhteissa kasvavilla puilla rungon epäpyöreyyden olevan yleisempää,

kuin metsässä kasvaneilla puilla. Useissa tutkimuksissa juuri epäpyöreiden on havaittu olevan läpimitan tarkkuuteen eniten vaikuttava tekijä (mm. West 2009; Kankare ym. 2011). Myös tässä tutkimuksessa osalla koepuista havaittiin, että rinnankorkeudella rungon poikkileikkauksessa on koepuiden välillä hajontaa (kuva 4.1). Epäpyöreiden vuoksi voivat rinnankorkeusläpimitat olla lehmuksilla epätarkempia, kuin vastaavasti metsässä kasvaneilla puilla.



Kuva 4.1. Esimerkkikuvat koepuiden poikkileikkausta vastaavasta runkomuodosta rinnankorkeudella.

Tässä tutkimuksessa, toisin kuin muissa tutkimuksissa yleisesti, maastossa mitattiin läpimitat johtamalla ne puun ympärysmitan kautta (kts. Liang ym. 2014; Saarinen ym. 2017). Referenssiksi maastossa kuitenkin mitattiin lähes kaikista puista ristiläpimitat, jotta vertailua kahden mittausmenetelmän välillä voitaisiin suorittaa. Ympärysmitan kautta laskettujen läpimittojen havaittiin tuloksissa olevan lähempänä pistepilvestä mitattuja läpimittoja, kuin mittasaksilla mitattu ristiläpimita (taulukko 3.1 ja 3.2). Jos pistepilvestä mitattujen läpimittojen tarkkuus oltaisiin laskettu vertaamalla niitä ristiläpimittoihin, olisi

systemaattinen virhe ollut noin 1,5 cm aliarvio verrattaessa pistepilven läpimittaa ristiläpimittaan. Ympärysläpimitasta johdettu läpimitta soveltui siten paremmin referenssiläpimitoiksi pistepilvestä mitattuja läpimittoja arvioitaessa. Kaikissa läpimitan mittaustavoissa on kuitenkin mukana virhettä. Esimerkiksi Kankaan ym. (2011) mukaan mittausvirheen hajonta on mittasaksilla noin 0,5 cm, joka johtuu puun epäpyöreyydestä ja väärästä mittauskorkeudesta.

Rungosta mitattua läpimittojen määrää käytetään yhtenä tunnuslukuna vertailtaessa runkokäyrän mittausten onnistumista (Kankare ym. 2013; Saarinen ym. 2017). Tässä tutkimuksessa saatiin läpimittoja mitattua rungon pistepilvestä lehdettömään aikaan keskimäärin 89 % ja lehdelliseen aikaan 60 % teoreettisesta läpimittahavaintojen maksimimäärästä (taulukko 3.4). Tulokset osoittavat, että keilausajankohdalla on selkeä vaikutus saatuihin läpimittaestimaattien määrään. Aikaisemmin esimerkiksi Kankare ym. (2013) on raportoinut männyillä vastaavaksi prosenttiosuudeksi parhaimmillaan 87 % ja kuusille 48 %. Saarinen ym. (2017) sai yksittäisistä keilauksista erotettua keskimäärin 44 %, kahdesta erillisestä keilauksesta 53 % ja koordinaatistossa yhdistetyistä keilauksista 60 % läpimittojen maksimimäärästä.

Läpimittojen suurempi suhteellinen määrä ei yksiselitteisesti tarkoita, että tulokset olisivat laadukkaampia, sillä kaikki estimoidut läpimitat eivät välttämättä ole peräisin rungolta. Estimoitaessa runkokäyrien pistepilvistä läpimittoja, on yhtenä mahdollisena virhelähteenä ylimääräiset turhat läpimitat, jotka eivät todellisuudessa perustu rungon koordinaattipisteisiin. Yhtenä mahdollisena syynä läpimittaestimaattien suurempaan suhteelliseen määrään voi olla myös koepuuaineistossa olevien puiden pituudet. Jos verrataan tässä tutkimuksella käytettyjen koepuiden keskipituutta Kankareen ym. (2013) ja Saarisen ym. (2017) koepuuaineistoon, ovat koepuut tässä tutkimuksessa keskimäärin 7-8 metriä lyhyempiä. Tästä seuraa, että pistetiheys puun latvaosassa on suurempi, joka voi sitä kautta lisätä runkokäyräalgoritmien mittaamien läpimittojen määrää. Toinen mahdollinen tekijä voi olla käytetyt runkokäyräalgoritmin parametrit. Tässä tutkimuksessa parametrit sallivat melko joustavasti läpimittaestimaattien syntymisen. Joskin täytyy huomioida, että lopulliset läpimittaestimaatit ovat laskettu suodatetuista läpimittaestimaateista, jolloin selkeästi virheelliset läpimittaestimaatit olivat poistettu. Käytettyjä runkokäyräalgoritmin arvoja ei voida suoraan verrata aikaisempiin tutkimuksiin, sillä esimerkiksi Kankare ym. (2013) ja Saarinen ym. (2017) eivät ole niitä artikkelissaan julkaisseet.

Koepuuaineiston pituudet saatiin tässä tutkimuksessa mitattua pistepilvestä keskimäärin 0,9 metrin tarkkuudella (RMSE). Tulokset osoittavat lisäksi pituuden suhteen systemaattista aliarviota keskimäärin noin 0,2 metrin verran (taulukko 3.3). Verrattuna aikaisempaan tutkimukseen systemaattinen virhe on samansuuntainen, kuin pääosassa aikaisempia tutkimuksia. Mittaustarkkuus on sen sijaan hieman muita tutkimuksia parempi. Tyypillisesti tutkimuksissa on raportoitu pituusmittauksen tarkkuuden olevan parhaimmillaan 1-2 metrin verran (Maas ym. 2008; Kankare ym. 2013; Kankare ym. 2014; Saarinen ym. 2017). Sen sijaan esimerkiksi Huang ym. (2011) on tutkimuksessaan saanut tarkkuudeksi 0,95 metriä (RMSE).

Tässä tutkimuksessa saadut pituusmittauksen tulokset ovat ainoastaan näennäisesti hieman parempia kuin muissa tutkimuksissa. Pituusmittauksen erot johtuvat pääasiassa koepuuaineistojen rakenteellisesta erosta koepuiden pituuksien suhteen. Tässä tutkimuksessa puut olivat keskimäärin noin 12 metrin pituisia. Muissa tutkimuksissa puut ovat olleet keskimäärin pidempiä. Esimerkiksi Kankareen ym. (2013) aineistossa puut olivat keskimäärin noin 19 metrisiä ja Saarisella ym. (2017) taas noin 20 metrin mittaisia. Huangin ym. (2011) aineistossa puut taas olivat kaikki alle 15 metriä pituisia.

Eri tutkimuksissa käytettyjen koepuuaineistojen rakenteellisista eroista vuoksi olisi perustellumpaa tehdä tutkimusten välistä vertailua populaation keskipituuteen suhteutettuihin tunnuslukuihin. Lehmuksilla saatiin pituuden osalta keskipituuteen suhteutettuna harhaksi -2,0 % ja RMSE:ksi 7,9 %. Aikaisemmissa tutkimuksissa esimerkiksi Kankare ym. (2013) sai vastaaviksi tarkkuusarvoiksi 2,65 % ja 8,05 %, Kankare ym. (2014) 6,6 % ja 8,03 % ja Saarinen ym. (2017) parhaimmillaan -6,9 % ja 9,4 %. Lehmusaineistoa pituuden puolesta lähempänä oleva aineisto oli käytössä Huangin ym. (2011), jossa RMSE:llä mitattuna suhteelliseksi tarkkuudeksi saatiin 6,3 %. Aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna tässä tutkimuksessa saadut tarkkuudet pituusmittaukselle ovat siten hyvin samalla tasolla. Puiden pituuden on myös aikaisemmin havaittu vaikuttavan pituusmittauksen tarkkuuteen. Pidemmillä puilla pistepilvestä tehdyn pituusmittauksen virheen on havaittu olevan suurempaa, kuin lyhyemmillä puilla (Wang ym. 2019). Luotettavasti pituus voidaan mitata, kun puiden pituus on 15-20 metrin välillä (Wang ym. 2019).

4.3 Runkokäyrämallin onnistuminen

Laasasenahon (1982) runkokäyrämalli saatiin sovitettua lehmuksille suunnitelmien mukaan. Mallin sovituksessa selityssasteet olivat kaikkien sovitusten tapauksessa suurimmat mahdolliset ja jäännöshajonnalla mitattuna paras sovitus saatiin, kun käytettiin koko koepuuaineistoa sovituksessa (taulukko 3.5). Koko koepuuaineistoon tehtyä sovitusta päädyttiin ristiinvalidoinnista saatuja tuloksien ja niitä vastaavien residuaalikuvien perusteella valitsemaan lopulliseksi runkokäyrämalliksi (taulukot 3.8 ja kuva 3.2). Runkokäyrämallille saatiin ristiinvalidoinnissa harhaksi $-8,2 \text{ dm}^3$ ($-1,9 \%$) ja RMSE:ksi $71,7 \text{ dm}^3$ ($17,0 \%$) (taulukko 3.8). Tähän verrattuna Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämallilla koepuuaineistolle ennustetut tilavuudet olivat RMSE:llä mitattuna tarkkuudeltaan noin 190 dm^3 (44%) ja harhalla -100 dm^3 (-24%) (taulukko 3.16). Studentin yksisuuntaisen parittaisen t-testin perusteella laskettu p-arvo $2,24\text{E-}06$ osoitti mallien välisten tarkkuuksien olevan erisuuruisia tilastollisesti merkitsevällä tasolla. Tulosten perusteella runkokäyrämallista saatiin systemaattista virhettä poistettua ja mallin harhaisuutta vähennettyä (kuvat 3.2 ja 3.8).

Lehmuksen runkokäyrämallin visuaalisella tarkastelulla nähtiin, että mallin käyttäytymisen poikkeaa jonkin verran siitä, miten Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämalli käyttäytyy puun rungolla (kuvat 3.4, 3.5, 3.6 ja 3.7). Ehkä selkeimpänä erona mallien käyttäytymisessä oli puun tyvi, jossa koivun malli kuvaa tyveä neiloidilla muodolla ja lehmuksen malli taas lähes lineaarisesti. Lehmuksen runkokäyrämallin erilainen käyttäytyminen puun tyvellä on myös erotettavissa suoraan mallin parametreista, sillä tyven jyrkkä muoto tulee mallin korkea-asteisimmista selittäväistä muuttujista β_7 ja β_8 (taulukko 4.2). Lehmuksen mallissa näitä vastaavat kertoimet ovat huomattavasti pienempiä, kuin koivun runkokäyrämallissa (taulukko 4.2).

Taulukko 4.2. Lehmukselle sovitetun runkokäyrämallin parametrit verrattuna Laasasenahon (1982) koivun runkokäyrämallin parametreihin.

Runkokäyrämallin								
kertoimet	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8
Lehmus	1,8035	-3,4998	4,4037	-	-3,6864	3,1253	-1,1052	0,1576
Koivu	0,9384	4,106	-7,8517	7,8993	-7,5018	6,3863	-4,3918	2,1604

Tarkasteltaessa kuvia 3.4, 3.5 ja 3.7, voidaan havaita puun tyvellä olevien läpimittahavaintojen antavan viitteitä siitä, että itse asiassa koivun runkokäyrämallia vastaava neiloidinen tyven muoto voisi soveltua lehmukselle paremmin, kuin lineaarinen muoto. Tämä olisi todennäköisesti ollut suhteellisen helppo ottaa interpoloinnin yhteydessä huomioon luomalla painotusvektori puun tyvelle, joka painottaa tyven alimpia läpimittahavaintoja ja pakottaa interpolointikäyrän kulkemaan näiden havaintojen kautta. Täyttä varmuutta siitä, että lehmuksen runkomuoto olisi tyveltä neiloidi, ei voida kuitenkaan täysin varmasti sanoa runkokäyrän kuvaajien perusteella, koska poikkeavia havaintoja ei voida täysin erottaa todellisista rungon läpimitoista. Aiheena jatkotutkimukselle voisikin olla tutkia lehmuksen runkokäyrää tarkemmin ja miten läheisesti se muistuttaa koivun runkokäyrää.

Yhtenä tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko eri ajankohtina keilatulla aineistolla vaikutusta mallien laatuun. Runkokäyrämallin sovituksen suhteen voidaan hieman yllätyksellisesti todeta, että ajankohdalla ei näyttäisi juurikaan olevan vaikutusta suoraan mallien sovittamisen hyvyyteen. Merkittäviä eroja mallin jäännöshajonnoissa, selityksasteissa, tai mallin selittävien muuttujien tilastollisessa merkitsevyydessä ei havaittu (taulukko 3.5, 3.6, 3.7). Myös mallin ristiinvalidoinnissa saadut tulokset ovat aineistojen välillä hyvin samankaltaiset (taulukko 3.8). Myöskään aineiston kasvattamisen vaikutukset, sovitettaessa runkokäyrä koko aineistoon, ei vaikuttanut merkittävästi mallin sovituksen tuloksiin, tai tilavuusestimaattien tarkkuuksiin. Koko aineiston osalta jäännöshajonta ainoana indikoi marginaalisesti parempaa mallin sopivuutta, joka yhdistettynä siihen, että kyseinen malli sisältää koko aineiston vaihtelun, oli syy siihen, että tätä sovitus vastava malli päädyttiin valitsemaan lopulliseksi mallisovitukseksi.

Ristiinvalidoinnin tulokset osoittivat hienoisia eroja mallien hyvyydessä, joiden mukaan lehdettömän ajankohdan aineistoon tehty sovitus antoi ristiinvalidoinnissa parhaimmat tulokset. Residuaalikuvien perusteella kuitenkin todettiin erojen olevan todennäköisesti pääosin peräisin yksittäisistä poikkeavista havainnoista, joiden vuoksi lopulliseksi mallisovitukseksi valittiin koko aineistoon sovitettu malli. Suuremmassa aineistossa yksittäisten poikkeavien havaintojen merkitys minimoituu.

Lopputuloksena läpimittaestimaattien määrän havaittiin olevan ainoa selkeästi ajankohdasta riippuvainen tulos. Läpimittojen estimaatteja saatiin lehdettömään ajankohtaan huomattavasti enemmän, kuin lehdellisen ajankohdan keilauksista. Eron pohjalta voidaan

päätyä siihen lopputulemaan, että lehdettömään ajankohtaan tehdyt keilaukset olisivat lähtökohtaisesti myös runkokäyrämallin sovituksen kannalta laadukkaampia. Jos talvella saadaan lukumääräisesti enemmän läpimittoja mitattua, niin todennäköisesti myös nämä mitatut läpimitat silloin sisältävät enemmän todellisia rungolta tulleita läpimittoja, jotka voisivat taustalla vaikuttaa runkojen interpoloinnin realistisuuden kautta myös sovitettaviin runkokäyrämalleihin. Tulosten perusteella voidaan selkeästi suositella mittausten suorittamista puiden ollessa lehdettäviä.

4.4 Tilavuusmallien onnistuminen

Tilavuusmallit muunnettiin ennen sovittamista muotoon, joka mahdollisti selittävien muuttujien kertoimien estimoinnin pienimmän neliösumman menetelmällä (Laasasenaho 1982). Sovitukset tehtiin kolmesti, ensin erikseen lehdettömään ja lehdelliseen osa-aineistoon ja lopuksi koko aineistoon. Kaikkien sovitusten yhteydessä mallit validointiin Leave-one-out -ristiinvalidointia käyttämällä. Ristiinvalidoinnin tuloksista laskettiin tilavuusestimaattien tarkkuuksia vastaavat tulokset, kuin mallit olisivat validoitu ulkoisessa aineistossa.

Rinnankorkeusläpimitaan perustuva malli

Rinnankorkeusläpimitaan perustuvan tilavuusmallin osalta sovituksessa paras mallin sovitus saatiin käyttäen lehdettömään ajankohtaan kerättyä osa-aineistoa (taulukko 3.10). Sovituksen tulokset kuitenkin osoittavat, ettei suuria eroja aineistojen välillä ole havaittavissa. Mallin sovitusten osalta kaikissa muissa, kuin lehdettömään ajankohtaan sovitetussa mallissa kaikki selittävät muuttujat ovat tilastollisesti merkitseviä. Lehdettömään aineistoon tehdyssä sovituksessa β_1 vastaava selittävä muuttuja sai p-arvon 0,136, joka siten viittasi lievään tilastollisen merkitsevyyden puuttumiseen (taulukko 3.10). Ristiinvalidoinnin tulokset eivät myöskään tuoneet esiin kovin suuria eroja eri mallisovitusten osalta (taulukko 3.13). Paras tarkkuus (RMSE) saavutettiin lehdettömään aineistoon tehdyllä sovituksella $102,6 \text{ dm}^3$ (23,2 %). Harhattomin tulos sitä vastoin saatiin käytettäessä koko aineistoa sovitukseen $-0,6 \text{ dm}^3$ (-0,1 %). Koko aineistoon verrattuna lehdettömään aineistoon tehdyssä sovituksessa harhan suuruus oli $2,6 \text{ dm}^3$ (0,6 %), eli suurista eroista mallien välillä ei ole kyse. Tulosten perusteella päädyttiin valitsemaan lehdettömään ai-

neistoon sovitettu malli lopulliseksi raportoitavaksi malliksi. Keskivirheeksi mallille laskettiin 104 dm^3 (23,4 %), joka on Laasasenahon (1982) koivun tilavuusmallille raportoituun keskivirheeseen (18,8 %) verrattuna hieman huonompi.

Verrattaessa rinnankorkeuteen perustuvaa lehmukselle sovitettua tilavuusmallia Laasasenahon (1982) koivun tilavuusmalliin voidaan residuaalikuvia tarkastelemalla nähdä, kuinka systemaattinen virhe saatiin mallista sovituksella poistettua (kuvat 3.3 ja 3.9). Koivun tilavuusmallilla saadut tulokset olivat tarkkuudeltaan (RMSE) 278 dm^3 (66 %) ja harhan osalta -200 dm^3 (-49 %) (taulukko 3.17). Tilavuusmallin perustuessa ainoastaan rinnankorkeusläpimittaan se on herkkä maantieteelliselle ja kasvuolosuhteisiin liittyvälle vaihtelulle, joiden vaikutuksesta ennustettavan puun pituuden suhde läpimittaan muuttuu. Tästä syystä jonkinasteinen harhaisuus oli koivun mallilla odotettavissa, sillä lehmusten dimensiot ja kasvupaikka ovat hyvin erilaiset, kuin metsässä kasvaneella koivulla. Lehmukselle tehdyn sovituksen osalta on perusteltua olettaa, että sovituksella saatiin aikaiseksi malli, joka on yleistettävissä Helsingin katulehmuksille. Samaan johtopäätökseen päädyttiin Studentin yksisuuntaisen parittaisen t-testin perusteella. Mallien tarkkuuksien erolle saatiin p-arvoksi $2,62\text{E-}12$, joka osoittaa mallien välisen eron olevan tilastollisesti merkitsevällä tasolla.

Rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuva malli

Kahden tunnuksen tilavuusmallin, eli rinnankorkeusläpimittaan ja puun pituuteen perustuvan mallin sovituksessa havaittiin jäännöskeskijajonnalla ja selitysasteella mitattuna lehdettömään aineistoon tehdyn mallisovituksen antavan parhaimmat sovituksen tulokset (taulukko 3.11). Sovitusten välillä ei kuitenkaan ollut merkittäviä eroja. Selittävien muuttujien tilastollinen merkitsevyys oli myös jokaisella muuttujalla alle tilastollisen merkitsevyysrajan 0,05 (taulukko 3.11). Ristiinvalidoinnissa saadut tulokset osoittivat, että koko aineistoon tehdyllä sovituksella saatiin parhaat tulokset. RMSE:llä mitattuna tarkkuudeksi saatiin 70 dm^3 (16,7 %) ja harhaksi $-0,4 \text{ dm}^3$ (-0,1 %) (taulukko 3.14). Erot sovitusten välillä olivat kuitenkin tämänkin mallin tapauksessa hyvin marginaaliset. Tulosten perusteella päädyttiin valitsemaan koko aineistoon sovitettu malli lopulliseksi raportoitavaksi malliksi. Keskivirheeksi mallille laskettiin $70,6 \text{ dm}^3$ (16,8 %), joka on Laasasenahon (1982) koivun mallille raportoituun keskivirheeseen (8,5 %) verrattuna kaksinkertainen.

Residuaalikuvia vertaamalla nähdään, että lehmukselle tehdyllä mallisovituksella saatiin systemaattinen yliarvio mallista pois verrattuna Laasasenahon (1982) koivun tilavuusmalliin (kuvat 3.3 ja 3.9). Koivun tilavuusmallilla saadut tulokset olivat tarkkuudeltaan (RMSE) 118 dm^3 (28 %) ja harhan osalta 38 dm^3 (9 %) (taulukko 3.17). Mallien tarkkuuksien väliselle erolle laskettiin Studentin yksisuuntaista parittaista t-testiä käyttämällä p-arvo, joka oli suuruudeltaan 0,071. Koska testissä saatu p-arvo on suuruudeltaan yli 0,05, ei mallien välinen tarkkuusero vaikuttaisi olevan tilastollisesti merkitsevällä tasolla. Lehmukselle sovitettu malli ei siten tilastollisesti merkitsevällä tasolla parantanut tilavuusestimaattien tarkkuutta. T-testin antama arvo on kuitenkin hyvin lähellä varsinaista merkitsevyysrajaa (0,05), joten yksiselitteisten johtopäätösten tekemiseen tulee suhtautua varauksella. Muun muassa Rannan ym. (2012) mukaan 0,05 merkitsevyysrajaa ei tulisi mieltää sellaiseksi, joka yksiselitteisesti määrittäisi eron merkitsevyydelle tai sen puuttumiselle.

Rinnakorkeusläpimitta, pituus ja yläläpimitta

Kolmen tunnuksen tilavuusmallin osalta paras mallin sovitus saatiin jäännöskeskiahjonnalla ja selitysasteella mitattuna lehdettömään aineistoon tehdyllä sovituksella (taulukko 3.12). Erot sovitusten hyvydessä selitysasteella ja jäännöskeskiahjonnalla mitattuna olivat tämänkin mallin tapauksessa hyvin marginaaliset. Mielenkiintoisena seikkana havaittiin mallin selittävien muuttujien osalta kaikkien sovitusten yhteydessä, että β_1 , β_2 ja β_4 vastaavat selittävät muuttujat saivat tilastollisesti ei-merkitsevät arvot kaikilla mallin sovituksilla. Lisäksi vakiotermi (β_0) oli merkitsevä ainoastaan koko aineistoon tehdyssä sovituksessa. Syitä mallin selittävien muuttujien tilastollisen merkitsevyyden puutteeseen on hankala yksilöidä. Merkitsevyyden puute voi johtua joko koepuuaineiston rakenteellisiin asioihin, tai mallin taustalla olevat oletukset puun runkomuotoon liittyen eivät päde yhtä vahvasti lehmuksella, kuin koivulla. Tämä on osin nähtävissä myös selitysasteen suuruuksissa, joiden havaittiin olevan alempia kuin muiden tilavuusmallien sovitusten yhteydessä (taulukot 3.10, 3.11, 3.12).

Vaikka mallin sovitus antoikin viitteitä siitä, että malli ei soveltuisi lehmuksille yhtä hyvin, kuin kaksi aikaisempaa tilavuusmallia, niin ristiinvalidoinnin tulokset osoittavat täysin päinvastaisia tuloksia (taulukko 3.15). Siinä kolmen tunnuksen tilavuusmallille saatiin koko aineistolla tarkkuudeksi (RMSE) $31,5 \text{ dm}^3$ (7,5 %) ja harhaksi $-0,1 \text{ dm}^3$ (0 %). Tulokset osoittivat koko aineistoon tehdyn sovituksen antavan parhaat tulokset, jonka vuoksi se valittiin lopulliseksi raportoitavaksi malliksi. Keskivirheeksi mallille laskettiin

31,7 dm³ (7,5 %), joka on Laasasenahon (1982) koivun mallille raportoituun keskivirheeseen (3,5 %) nähden noin tuplasti suurempi.

Residuaalikuvia vertaamalla nähdään, että lehmukselle tehdyllä mallisovituksella saatiin systemaattinen yliarvio mallista poistettua verrattuna koivun tilavuusmalliin (kuvat 3.3 ja 3.9). Koivun tilavuusmallilla saadut tulokset olivat tarkkuudeltaan (RMSE) 80,9 dm³ (19 %) ja harhan osalta 39 dm³ (9 %) (taulukko 3.17). Mallien tarkkuuksien väliselle erolle laskettiin Studentin yksisuuntaista parittaista t-testiä käyttämällä p-arvo, joka oli suuruudeltaan 9,91E-05. P-arvon perusteella mallien välinen ero tarkkuudessa oli tilastollisesti merkitsevällä tasolla. Sen perusteella lehmukselle sovitettun tilavuusmallin voidaan perustellusti tulkita parantaneen tilavuusestimaatin tarkkuutta ja lehmukselle sovitettu malli on siten myös yleistettävissä Helsingin katulehmuksille.

Yhteenveto

Yhteenvetona tilavuusmallien sovittamisesta voidaan todeta, että sovittaminen saatiin tehtyä kaikilla kolmella tilavuusmallilla, kuten tutkimuksessa tavoitteena oli. Tutkimuskysymyksinä haluttiin erityisesti tutkia, onko eri ajankohtina kerätyllä aineistolla, tai aineiston koolla vaikutusta tilavuusmallien sovituksen hyvytyteen. Tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että lehdettömään aineistoon tehdyt sovitukset antoivat yhtä mallia lukuunottamatta jäännöskehajonnulla, selitysasteella ja ristiinvalidoinnissa parhaimmat tulokset. Erot ovat kuitenkin hyvin marginaalisia kahden ajankohdan välillä ja siksi ei voida perustellusti osoittaa kummankaan ajankohdan aineistoa toistaan paremmaksi.

Sama pätee myös aineiston koon kasvattamiseen. Kun malli sovitettiin osa-aineistojen sijasta koko aineistoon ja aineiston koko sitä kautta tuplaantui, ei tästä huolimatta ollut selkeästi nähtävissä tämän vaikutusta mallin sovituksen hyvytydessä. Tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että vaikka tässä tutkimuksessa käytetty aineisto oli kooltaan pieni, niin tästä huolimatta mallien sovitusta voidaan siitä huolimatta tehdä suhteellisen luotettavalla tavalla pientäkin aineistoa käyttämällä. Mallin sovittamisessa käytetyn aineiston koko ei merkittävästi vaikuttanut validoinnista saatuihin tarkkuuksiin. Tämä antaa viitteitä siitä, että pienelläkin aineistolla voidaan saada kiinni koko populaation sisältämä vaihtelu. Pienessä aineistossa on kuitenkin aina se riski, että yksittäiset poikkeavat havainnot pääsevät vaikuttamaan olennaisella tasolla mallin lopulliseen muotoon. Tästä syystä lähtökohtaisesti tulisi aina pyrkiä maksimoimaan mallin sovittamisessa käytettävän aineiston kokoa, jotta poikkeavista havainnoista johtuvilta riskeiltä vältyttäisiin.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli sovittaa Laasasenahon (1982) laatimat runkokäyrä- ja tilavuusmallit Helsingin kaupungin katulehmukille. Tutkimuksessa käytetty aineisto koostui maastolaserkeilauksella kahteen eri vuodenaikaan kerätystä osa-aineistosta. Kokonaisuudessaan aineisto oli kooltaan 75 kpl koepuita, josta 36 kpl oli keilattu kesällä 2016 ja 39 kpl talvella 2017. Tutkimuksessa onnistuttiin sovittamaan tilavuus- ja runkokäyrämallit kerättyyn koepuuaineistoon. Mallien sovituksesta ja validoinnista lasketut tunnusluvut osoittavat mallien tarkkuuksien olevan hyviä ja tunnusluvut osoittavat mallien olevan yleistettävissä Helsingin katupuulehmukille.

Tuloksiin täytyy kuitenkin suhtautua siinä mielessä kriittisesti, että vaikka sovitettujen mallien tarkkuudet ovat hyvät, niin mallien tarkkuus on suoraan riippuvainen koepuista mitattujen runkokäyrien tarkkuuksista. Jos mallien sovittamisessa käytetyt runkokäyrät sisältävät virhettä, niin mallit myös sisältävät saman tai kertaantuneen virheen. Jos mitatut runkokäyrät vastaavat todellisia runkokäyriä, niin ovat myös saadut mallit harhattomia ja niiden tarkkuudet tässä tutkimuksessa esitetyn mukaisia. Jos taas interpoloidut runkokäyrät sisältävät virhettä, niin tämä virhe on myös mukana lopullisissa malleissa ja vaikuttaa niillä tehtyihin ennusteisiin. Virheen määrästä ei kuitenkaan voida tehdä tarkkoja arvioita tämän tutkimuksen perusteella, koska mahdollisuutta verifioida maastolaserkeilauksella hankitun aineiston laatua kontrollimittausten avulla ei ollut. Aikaisempaa tutkimusta aiheeseen liittyen on kuitenkin olemassa ja sen perusteella maastolaserkeilatusta pistepilvestä mitattujen runkokäyrien voidaan olettaa olevan hyvin luotettavia (Astrup ym. 2014; Liang ym. 2014 ja Saarinen ym. 2014). Siksi riskiä merkittävään virheellisyyteen ei voida aikaisemman tutkimuksen perusteella pitää todennäköisenä.

Poikkeavien havaintojen mahdollisuutta ja niiden vaikutusta malleihin ei voida täysin myöskään sulkea tuloksiin vaikuttavien tekijöiden ulkopuolelle. Tässä tutkimuksessa käytetty koepuuaineisto oli kooltaan suhteellisen pieni verrattuna vastaavien mallien sovittamisessa aikaisemmin käytettyjen aineistojen kokoon (kts. Laasasenaho 1982). Mallien sovitusaaineiston ollessa pieni voi yksittäiset poikkeavat havainnot päästä vaikuttamaan merkittävästi mallin muotoon. Malleilla tehdyt sovitukset osa-aineistoihin ja koko aineistoon eivät kuitenkaan olennaisella tasolla muuttaneet mallien muotoa, selityskykyä tai ristiinvalidoinnin tuloksia.

Yhtenä tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko eri ajankohtina keilatuilla aineistoilla ja toisaalta aineistoon sisällytettävien puiden lukumäärällä vaikutusta sovitettujen mallien hyvyyteen. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että keruuajankohdalla tai aineiston koolla ei ole suoraan nähtävissä olevaa vaikutusta mallien hyvyyteen. Tästä huolimatta selkeitä viitteitä siitä, että aineiston keruu olisi suositeltavaa toteuttaa lehdettömään aikaan saatiin tutkimuksen tuloksissa esiin. Lehdettömään aikaan kerätyn aineiston osalta runkokäyräalgoritmillä saatiin estimoitua selkeästi enemmän läpimittoja puiden rungoilta ja myös puiden pistepilvet olivat talvella selvästi yksityiskohtaisempia, kuin lehdelliseen aikaan. Se, että aineiston yksityiskohtaisuus ei lopulta näkynyt sovitetuissa malleissa, johtui todennäköisesti käytetystä splini-interpoloinnista. On mahdollista, että interpolointi keskiarvoisti runkokäyriä, tai toisaalta paikkasi niiden puutteita siinä määrin, että alkupe-
räisen aineiston yksityiskohdat eivät lopulta näkyneet enää lopullisissa malleissa.

Jatkotutkimuksen kannalta olisi kiinnostavaa pyrkiä tarkentamaan tässä tutkimuksessa esitettyjä runkokäyrä- ja tilavuusmalleja keräämällä mallien pohjaksi suurempi koepuu-
aineisto maastolaserkeilauksella. Keilausaineiston oheen olisi hyvä saada muutama sellainen koepuu, joiden runkokäyrät voitaisiin referenssiksi mitata manuaalisella runkoanalyysillä, jotta keilauksista erotettujen runkokäyrien laadusta voidaan varmistua. Aineiston keräämisajankohdaksi voidaan varauksetta suositella talvea, tai aikaista kevättä, jolloin puut ovat lehdettäviä. Mahdollisen jatkotutkimuksen aiheena voisi myös keilausajankohdan vaikutusta aineiston keruuseen tutkia siten, että eri ajankohtina keilattava aineisto sisältäisi samat koepuut ajankohdasta riippumatta. Tällöin kaikki muut tekijät, paitsi lehtien vaikutus keilattuun pistepilven tarkkuuteen voitaisiin vakioda. Jatkotutkimuksen kannalta myös runkokäyräalgoritmissa käytetyt parametrit olisivat mielenkiintoinen tutkimuksen kohde. Lisäselvitystä voisi kohdentaa esimerkiksi ympyräsovituksen pohjana käytettyyn pistemäärään sekä pistepilven leikkauksessa käytettyyn korkeusväliin. Parametrivaihtoehtoja ja niiden vaikutusta mitattujen läpimittaestimaattien luotettavuuteen olisi hyödyllistä kartoittaa.

6 LÄHTEET

- Ahonen, O-P. 1996. Puun muodon ennustaminen runkokäyrillä ja simuloimalla. Metsä-
tehon katsaus 4: 1-8.
- Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J. & Winnett, S., 1992. Cooling our commu-
nities. A guidebook on tree planting and light-colored surfacing. US Environmental Pro-
tection Agency, Washington, DC. 246 s.
- Akbari, H. 2002. Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power
plants. *Environmental pollution* 116: 119-126.
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa
käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. Teknologian tutkimus-
keskus VTT Oy. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>. [Vii-
tattu 15.9.2018]
- Amateis, R. L. & Burkhardt, H. E. 1987. Cubic-foot volume equations for loblolly pine
trees in cutover, site-prepared plantations. *Southern Journal of Applied Forestry* 11(4):
190-192.
- Astrup, R., Ducey, M. J., Granhus, A., Ritter, T., & von Lüpke, N. 2014. Approaches for
estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. *Ca-
nadian journal of forest research* 44(6): 666-676.
- Avery, T. E. & Burkhardt, H. E. 1983. Forest measurements. Ed. 5. Waveland Press. New
York. 456 s.
- Aylor, D. 1972. Noise reduction by vegetation and ground. *The Journal of the Acoustical
Society of America* 51(1B): 197-205.
- Bayer, D., Seifert, S., & Pretzsch, H. 2013. Structural crown properties of Norway spruce
(*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in mixed versus pure
stands revealed by terrestrial laser scanning. *Trees* 27(4): 1035-1047.
- Béland, M., Widlowski, J. L., Fournier, R. A., Côté, J. F., & Verstraete, M. M. 2011.
Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements.
Agricultural and Forest Meteorology 151(9): 1252-1266.
- Bienert, A., Scheller, S., Keane, E., Mohan, F., & Nugent, C. 2007. Tree detection and
diameter estimations by analysis of forest terrestrial laser scanner point clouds. In *ISPRS
workshop on laser scanning* 66: 50-55.
- Burkhardt, H. E. 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit.
Southern Journal of Applied Forestry 1(2): 7-9.
- Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raumonen, P., Herold, M., Culvenor,
D., Avitabile, V., Disney, M., Armston, J., & Kaasalainen, M. 2015. Nondestructive es-
timates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology
and Evolution* 6(2): 198-208.

- Cardelino, C. A., & Chameides, W. L. 1990. Natural hydrocarbons, urbanization, and urban ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 95(D9): 13971-13979.
- Cifuentes, R., Van der Zande, D., Farifteh, J., Salas, C., & Coppin, P. 2014. Effects of voxel size and sampling setup on the estimation of forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning data. *Agricultural and forest meteorology* 194: 230-240.
- Danson, F. M., Hetherington, D., Morsdorf, F., Koetz, B., & Allgower, B. 2007. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning. *IEEE Geoscience and remote sensing letters* 4(1): 157-160.
- Dassot, M., Constant, T., & Fournier, M. 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of forest science* 68(5): 959-974
- Douglas, E.S., Martel, J., Li, Z., Howe, G., Hewawasam, K., Marshall, R.A., Schaaf, C.L., Cook, T.A., Newnham, G.J., Strahler, A., & Chakrabarti, S. 2015. Finding Leaves in the Forest: The Dual-Wavelength Echidna Lidar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. *IEEE* 12(4): 776-780.
- Eerikäinen, K.P.A., Mabvurira, D. ja Saramäki, J. 1999. Alternative taper curve estimation methods for *Eucalyptus cloeziana* (F. Muell.). *Southern African Forestry Journal* 184:12-24.
- Eerikäinen, K. 2001. Stem volume models with random coefficients for *Pinus kesiya* in Tanzania, Zambia, and Zimbabwe. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 879-888.
- Embrén, B., Alvem, B., Stål, Ö. & Orvesten, A. 2009. Planting beds in the city of Stockholm - a handbook. Trafikkontoret av Stockholms stad. Stockholm. Saatavissa: http://fo-retag.stockholm.se/PageFiles/192562/100322%20GH_HB%20STHLM%20-%20Engelsk%20version.pdf. [Viitattu 15.11.2018].
- Fehrmann, L., & Kleinn, C. 2006. General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe. *Forest Ecology and Management* 236(2-3): 412-421.
- Flæte, P.O. & Høibø, O. 2009. Models for predicting vertical profiles of heartwood diameter in mature Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 527-536.
- Fries, J. ja Matern, B. 1965. On the use of multivariate methods for the construction of tree taper curves. Advisory Group of Forest Statisticians of the IUFRO, Sect. 28, 2nd Conference, Stockholm, Sweden, 1965. Rapp. och Upps. Inst. Skoglig Mat. Stat. Skogshögskolan 9: 85—117.
- Garmin Ltd. 2004. Garmin GPSMAP 60cs – Owners manual. Valmistajan maastopaikantimesta ilmoittamat tekniset tiedot. Saatavissa: http://static.garmin.com/pumac/GPS-MAP60CS_OwnersManual.pdf [Viitattu: 27.2.2018].
- Harry Jr, V., Spangler, M. L., & Baumgras, J. E. 2002. Comparison of estimates of hardwood bole volume using importance sampling, the centroid method, and some taper equations. *Northern Journal of Applied Forestry* 19(3): 141-142.

- Heinonen, J., Saramäki, J. ja Sekeli, P.M. 1996. A polynomial taper curve function for Zambian exotic tree plantations. *Journal of Tropical Forest Science* 8: 339-354.
- Heisler, G. M., 1990, Mean wind speed below building height in residential neighborhoods with different tree densities, *ASHRAE Trans.* 96(1):1389–1396.
- Heisler, G. M., Grant, R. H., Grimmond, S., and Souch, C., 1995, Urban forests' cooling our communities?, in *Proceedings of the Seventh National Urban Forestry Conference*. American Forests, Washington, DC. 31–34.
- Helsingin kaupungin rakennusvirasto. 2014a. Rakennusviraston kaupunkipuuselvitys-Taustaselvitys ja nykytilan kuvaus osa 1. Helsingin kaupungin rakennusviraston julkaisut 2014:4. Saatavissa: https://www.hel.fi/static/hkr/julkaisut/2014/kaupunkipuu/taustaselvitys_web_osal.pdf. [Viitattu 23.11.2018].
- Helsingin kaupungin rakennusvirasto. 2014b. Rakennusviraston kaupunkipuuselvitys-Taustaselvitys ja nykytilan kuvaus osa 2. Helsingin kaupungin rakennusviraston julkaisut 2014:4. Saatavissa: https://www.hel.fi/static/hkr/julkaisut/2014/kaupunkipuu/taustaselvitys_web_osal2.pdf. [Viitattu 23.11.2018].
- Helsingin kaupunki 2012. Pääkaupunkiseudun kartoille uudet koordinaatit ja korkeustiedot. Lehistötiedote 15.11.2012. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: https://ptp.hel.fi/avoindata/aineistot/2012_11_15_Paakaupunkiseudun_kartoille_uudet_koordinaatit.pdf. [Viitattu 12.2.2018].
- Helsingin kaupunki. 2018. Esitys Hiilineutraali Helsinki 2035 -toimenpideohjelmaksi. Helsingin kaupungin keskushallinnon julkaisuja 4:116s. Saatavissa: <https://www.hel.fi/sta-tic/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/HNH-2035-toimenpideohjelma.pdf> [Viitattu 30.12.2018]
- Henning, J.G. & Radtke, P. J., 2006. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science* 52(1): 67–80.
- Holopainen, M., Hyyppä, J. & Vastaranta, M. 2013a. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteidenlaitoksen julkaisuja 5: 1-75.
- Holopainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Liang, X., Lin, Y., Vaaja, M., Yu, X., Hyyppä, J., Hyyppä, H., Kaartinen, H., Kukko, A., Tanhuanpää, T., & Alho, P. 2013b. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning – A case study in a heterogeneous urban forest. *Urban forestry & urban greening* 12(4): 546-553.
- Honer, T. G. 1965. A new total cubic foot volume function. *The Forestry Chronicle* 41(4): 476-493.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C., Treitz, P., 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research* 34 (3): 573–583.
- Hopkinson, C., Lovell, J., Chasmer, L., Jupp, D., Kljun, N., & van Gorsel, E. 2013. Integrating terrestrial and airborne lidar to calibrate a 3D canopy model of effective leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 136: 301-314.

- Huang, H., Li, Z., Gong, P., Cheng, X., Clinton, N., Cao, C., Ni, W., & Wang, L. 2011. Automated methods for measuring DBH and tree heights with a commercial scanning Lidar. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 77: 219–227.
- Hulevesiopas. 2012. Suomen kuntaliitto. Helsinki 2012. ISBN 978-952-213-896-5
- Husch, B., Miller, C.I. & Beers, T. W. 1982. *Forest mensuration*. John Wiley & Sons. 402s.
- Höjer, A. G. 1903. *Tallens och granens tillväxt. Bihang till FR. Lovén: Om våra barrskogar*. Stockholm. (Ruotsiksi).
- Jokinen, J. 2017. Katso kuvat hämmästyttävän suureksi paisuneesta surusta – Mechelinikadun kaadetuille lehmuksille kannettu jopa hautakynntilöitä. *Helsingin sanomat* (Julkaistu: 26.1.2017).
- Kaasalainen, S., Hyypä, J., Karjalainen, M., Krooks, A., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., & Jaakkola, A. 2010. Comparison of terrestrial laser scanner and synthetic aperture radar data in the study of forest defoliation. Wagner W., Székely, B. (eds.): *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS*.
- Kangas, A., Aakala, T., Alanen, H. Haavisto, M., Heikkilä, J., Kaila, A., Kankaanpää, S., Kämäri, H., Leino, O., Mäkinen, A., Nurmela, E., Oksa, S., Saari, A., Tikkanen, S-M. & Wathén, M. 2004. Lahopuuinventoinnin menetelmien vertailu Nuuksion ulkoilualueilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1: 43–51.
- Kangas, A., Päivinen, R., Holopainen, M., & Maltamo, M. 2011. *Metsän mittaus ja kartotus*. 3. uudistettu painos. Itä-Suomen Yliopisto. Metsätieteiden osasto.
- Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., Vaaja, M., Hyypä, H. & Alho, P. 2013. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 75: 64-75.
- Kankare, V., Vauhkonen, J., Tanhuanpää, T., Holopainen, M., Vastaranta, M., Joensuu, M., Krooks, A., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P., & Viitala, R. 2014. Accuracy in estimation of timber assortments and stem distribution—A comparison of airborne and terrestrial laser scanning techniques. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 97: 89-97.
- Kankare, V., Liang, X., Vastaranta, M., Yu, X., Holopainen, M., & Hyypä, J. 2015. Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 108: 161-171.
- Kaplan, R. 1993. The role of nature in the context of the workplace. *Landscape and urban planning* 26(1-4): 193-201.
- Kilkki, P., Saramäki, M. & Varmola M. 1978. A simultaneous equation model to determine taper curve. *Silva Fennica* 12:120-125.
- Kilkki, P. & Varmola, M. 1981. Taper curve models for Scots pine and their applications. *Acta Forestalia Fennica* 174. 60 s.

- Kilkki, P. 1983. Sample trees in timber volume estimation. *Acta Forestalia Fennica* 145. 33s.
- Knoebel, B. R., Burkhart, H. E., & Beck, D. E. 1984. Stem volume and taper functions for yellow-poplar in the southern Appalachians. *Southern Journal of Applied Forestry* 8(4): 185-188.
- Korhonen, K. T. ja Maltamo, M. 1990. Männyn maanpäällisten osien kuivamassat Etelä-Suomessa. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 371. 29s.
- Korhonen, K.T. 1991. Sekamallitekniikalla laadittujen runkokäyrämallien käyttö metsäinventoinnissa. *Folia Forestalia* 774. 27 s.
- Korhonen, K.T. 1993. Mixed estimation in calibration of volume functions of Scots pine. *Silva Fennica* 27(4):269-276
- Korhonen, K. T. 1994. Calculation system for large-scale forest inventory. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 505. 36 s.
- Korhonen, K. T., Ihalainen, A., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H. M., Hotanen, J-P., Nevalainen, S., Pitkänen, J., Strandström, M. ja Viiri, H. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 59. Luonnonvarakeskus. 88s.
- Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. *Canadian Journal of Forest Research*. 18:1363-1368.
- Kozak, A. 1997. Effects of multicollinearity and autocorrelation on the variable-exponent taper functions. *Canadian Journal of Forest Research* 27:619-629.
- Kuo, F. E., Bacaicoa, M., & Sullivan, W. C. 1998. Transforming inner-city landscapes: Trees, sense of safety, and preference. *Environment and behavior* 30(1): 28-59.
- Kuo, F. E., & Sullivan, W. C. 2001a. Aggression and violence in the inner city: Effects of environment via mental fatigue. *Environment and behavior* 33(4): 543-571.
- Kuo, F. E., & Sullivan, W. C. 2001b. Environment and crime in the inner city: Does vegetation reduce crime? *Environment and behavior* 33(3): 343-367.
- Kuo, F. E. 2003. Social aspects of urban forestry: The role of arboriculture in a healthy social ecology. *Journal of Arboriculture* 29 (3): 148-155.
- Laasasenaho J. 1982. Taper curve and volume function for pine, spruces and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108: 1–74.
- Lahtinen, A. & Laasasenaho, J. 1979. On the construction of taper curves by using spline functions. *Communicationes institute Forestalis Fenniae*. 95. 63s.
- Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analyzing and predicting stem form variation of Scots pine. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 134. 69 s.
- Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R., Liski, J., 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188: 221–224.

- Leica Geosystems AG. 2009. Leica HDS6100 – Latest generation of ultra-high speed laser scanner. Valmistajan keilaimesta julkaisemat tekniset tiedot. Saatavissa: <http://archive.cyark.org/temp/LeicaHDS6100Datasheetus.pdf> [Viitattu: 25.2.2018].
- Li, R., & Weiskittel, A. R. 2010. Comparison of model forms for estimating stem taper and volume in the primary conifer species of the North American Acadian Region. *Annals of Forest Science* 67(3): 302.
- Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Kukko, A. & Holopainen, M. 2011. Automatic plot-wise tree location mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *The Photogrammetric Journal of Finland* 22(2): 37–48.
- Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M. & Holopainen, M. 2012. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(2): 661–670.
- Liang, X., & Hyypä, J. 2013. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors* 13(2): 1614-1634.
- Liang, X., Kankare, V., Yu, X., Hyypä, J., & Holopainen, M. 2014. Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52(3): 1739-1748.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., ... & Holopainen, M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115: 63-77.
- Liang, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., Pyörälä, J., Pfeifer, N., ... & Huang, H. 2018. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 144: 137-179.
- Lin, Y., & Herold, M. 2016. Tree species classification based on explicit tree structure feature parameters derived from static terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology* 216: 105-114.
- Lindfors, V., & Laurila, T. 2000. Biogenic volatile organic compound (VOC) emissions from forests in Finland. *Boreal environment research* 5(2): 95-113.
- Litkey, P., Liang, X., Kaartinen, H., Hyypä, J., Kukko, A., & Holopainen, M. 2008. Single-scan TLS methods for forest parameter retrieval. *Proceedings of SilviLaser 8*: 295–304.
- Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Newnham, G.J. & Culvenor, D.S. 2011. Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed view-point. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66: 46–55.
- Luley, C. J., Bond, J., & Agencies, C. 2002. A plan to integrate management of urban trees into air quality planning. Naples, NY: Davey Resource Group.
- Luonnonvarakeskus 2009. Ilmastovaikutukset ja hiilensidonta [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/northernpine/ilmastovaikutukset-ja-hiilensidonta.html>. [Viitattu: 11.10.2018].

Luonnonvarakeskus 2012. Suomen metsät 2012: Monimuotoisuus. Puulajisuhteet. [verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/kestavyys/c4-tree-species.htm>. [Viitattu: 30.12.2018].

Maanmittauslaitos 2018. Laserkeilausaineisto. Maanmittauslaitoksen internetsivut.. Saatavilla: <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/laserkeilausaineisto>. [Viitattu: 16.2.2019].

Maas, H. G., Bienert, A., Scheller, S., & Keane, E. 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International journal of remote sensing* 29(5): 1579-1593

Maltamo, M. & Laukkanen, S. (Toim.) 2001. Metsää kuvaavat mallit. Joensuun yliopiston metsätieteellinen tiedekunta. *Silva Carelica* 36: 1-239.

Matero, J., Saastamoinen, O., & Kouki, J. 2003. Metsien tuottamat ekosysteemipalvelut ja niiden arvottaminen. *Metsätieteen aikakauskirja* 3: 355-384.

Max, T.A. ja Burkhart, H.E. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. *Forest Science* 22:283-289.

McHale, M. R., Burke, I. C., Lefsky, M. A., Peper, P. J., & McPherson, E. G. 2009. Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees?. *Urban Ecosystems* 12(1): 95-113.

McPherson, E.G. 1992. Accounting for benefits and costs of urban green space. *Landscape and Urban Planning* 22: 41–51.

McPherson, E. G., Nowak, D., Heisler, G., Grimmond, S., Souch, C., Grant, R., & Rowntree, R. 1997. Quantifying urban forest structure, function, and value: the Chicago Urban Forest Climate Project. *Urban ecosystems* 1(1): 49-61.

Millennium Ecosystem Assessment 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC. 137 s.

Moorthy, I., Miller, J. R., Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P., Hu, B., & Chen, J. 2011. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(2): 204-214.

Moskal, L. M., & Zheng, G. 2012. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing* 4(1): 1-20.

Mossberg, B., Vuokko, S. & Väre, H. 2012. *Suuri pohjolan kasvio* (3. tark. p.). Helsinki: Tammi. 928s.

Määttä, M. 1987. Taper curve functions for *Cupressus lusitanica* and *Pinus patula* in north-east Tanzanian softwood plantations. *Helsingin yliopisto*. 11 s.

Nevanlinna, H. 2008. *Muutamme ilmastoja*. Ilmatieteen laitoksen tutkijoiden katsaus ilmastomuutokseen. WS Bookwell Oy, Porvoo 2008. 48 s.

Nowak, D. J., & Dwyer, J. F. 2007. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In *Urban and community forestry in the northeast 2007*: 25-46.

- Othmani, A., Piboule, A., Dalmau, O., Lomenie, N., Mokrani, S., & Voon, L. F. C. L. Y. 2014. Tree Species Classification Based on 3D Bark Texture Analysis. Image and Video Technology. Springer Berlin Heidelberg 279-289
- Ow, L. F., & Ghosh, S. 2017. Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. Applied Acoustics 120: 15-20.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. Forest science 45(4): 573-593.
- Perez, D.N., Burkhardt, H.E. & Stiff, C.T. 1990. A variable-form taper function for *Pinus oocarpa* Schiende in central Honduras. Forest Science. 36:186-191.
- Peters, R. 1971. Konstruktion eines Massentafel modells. Dargestellt am Beispiel der Baumart *Araucaria araucana* (Mol.) C. Koch, Inaugural-Dissertation. Freiburg. (Saksaksi)
- Pfeifer, N., & Winterhalder, D. 2004. Modelling of tree cross sections from terrestrial laser scanning data with free-form curves. International Archives of Photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences 36(8): 76-81.
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. 2012. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestön julkaisu (eng. FAO; Food and Agricultural Organization of the United Nations). 207 s.
- Puttonen, E., Suomalainen, J., Hakala, T., Räikkönen, E., Kaartinen, H., Kaasalainen, S., & Litkey, P. 2010. Tree species classification from fused active hyperspectral reflectance and LIDAR measurements. Forest Ecology and Management 260(10): 1843-1852.
- Puumalainen, J. 1998. Optimal cross-cutting and sensitivity analysis for various log dimension constraints by using dynamic programming approach. Scandinavian Journal of Forest Research 13: 74-82.
- Pyörälä, J., Liang, X., Saarinen, N., Kankare, V., Wang, Y., Holopainen, M., Hyypä, J., & Vastaranta, M. 2018a. Assessing branching structure for biomass and wood quality estimation using terrestrial laser scanning point clouds. Canadian Journal of Remote Sensing 1-14.
- Pyörälä, J., Kankare, V., Liang, X., Saarinen, N., Rikala, J., Kivinen, V. P., Sipi, M., Holopainen, M., & Vastaranta, M. 2018b. Assessing log geometry and wood quality in standing timber using terrestrial laser-scanning point clouds. An International Journal of Forest Research 92: 177-187.
- Pöytäniemi, A-M. 1981. Schaftkurvensystem fiir die Fichten zur Anwendung bei der österreichischen Forstinventur. Wien: Verband der Wissenschaftl. (Saksaksi).
- R Development Core Team. 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 2012. Biometria – Tilastotiedettä ekologeille. Yliopistopaino, Helsinki. 569 s.

- Rasinmäki, J. & Känkänen, R., 2014. Kuntien hiilitasekartoitus osa 1. Helsingin, Lahden, Turun, Vantaan ja Espoon maankäyttösektorin kasvihuonepäästöt, hiilinielut ja hiilivarastot. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisu 2014: 9: 1-63. Saatavilla: <https://www.hel.fi/static/ymk/julkaisut/julkaisu-09-14.pdf>. [Viitattu 12.12.2018].
- Raunonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney, M., & Lewis, P. 2013. Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sensing* 5(2): 491-520.
- Reed, D. D., & Green, E. J. 1984. Compatible stem taper and volume ratio equations. *Forest Science* 30(4): 977-990.
- Repola, J. 2008. Biomass equations for birch in Finland. *Silva Fennica* 42(4): 605–624.
- Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4): 625–647.
- Riikonen, A., Hölttä, T., Paljakka, T. & Nikinmaa, E. 2016. Selvitys katujen suolauksen vaikutuksista katupuihin Helsingissä. Helsingin kaupungin rakennusviraston julkaisu 5:2016. Saatavilla: https://www.hel.fi/static/hkr/julkaisut/2016/hkr_suolaselvitys_web.pdf [Viitattu 24.2.2018].
- Roiko-Jokela, P. 1974. Die schafftfunktionen der Fichte und die Bestimmung der Sortimentsanteile am stehenden Baum. Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. 114 s.
- Rojo, A., Perales, X., Sánchez-Rodríguez, F., Álvarez-González, J. G., & Von Gadow, K. 2005. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (North-western Spain). *European Journal of Forest Research* 124(3): 177-186.
- Saarinen, N., Vastaranta, M., Kankare, V., Tanhuanpää, T., Holopainen, M., Hyypä, J., & Hyypä, H. 2014. Urban-tree-attribute update using multisource single-tree inventory. *Forests* 5(5): 1032-1052.
- Saarinen, N., Kankare, V., Vastaranta, M., Luoma, V., Pyörälä, J., Tanhuanpää, T., Liang, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Jaakkola, A., Yu, X., Holopainen, M., & Hyypä, J. 2017. Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 123: 140-158.
- Salminen, S. 1993. Eteläisimmän Suomen metsävarat 1986-1988. *Folia Forestalia* 825. Metsäntutkimuslaitos 1993. 111s.
- Sanders, R. A. 1986. Urban vegetation impacts on the hydrology of Dayton, Ohio. *Urban Ecology* 9(3-4): 361-376
- Schroeder, H. W. 1989. Environment, behavior, and design research on urban forests. In *Advance in Environment, Behavior, and Design* 87-117. Springer, Boston, MA.
- Schroeder, H. W. 1991. Preference and meaning of arboretum landscapes: Combining quantitative and qualitative data. *Journal of Environmental Psychology* 11(3): 231-248.

Seidel, D., Fleck, S., & Leuschner, C. 2012. Analyzing forest canopies with ground-based laser scanning: a comparison with hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 154: 1-8.

Seppälä, J. 2004. Ympäristövaikutusten arviointi elinkaariarvioinnissa – alailmakehän otsonin muodostuminen, happamoituminen, pienhiukkaset ja ekotoksisuus. Suomen ympäristö 673. Edita Prima Oy. Helsinki 2004.

Smith, W. H., 1990, *Air Pollution and Forests*, Springer-Verlag, New York.

Taha, H. 1996. Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment* 30(20): 3423-3430.

Tanhuanpää, T., Kankare, V., Vastaranta, M., Saarinen, N., Holopainen, M., Raisio, J., ... & Hyyppä, H. 2014. 3D-tiedosta lisäarvoa kaupunkien vihersuunnitteluun sekä katu- ja puistopuiden hoitoon. *Metsätieteen aikakauskirja* 2014(4): 257- 262

Tanhuanpää, T., Kankare, V., Setälä, H., Yli-Pelkonen, V., Vastaranta, M., Niemi, M. T., ... & Holopainen, M. 2017a. Assessing above-ground biomass of open-grown urban trees: A comparison between existing models and a volume-based approach. *Urban forestry & urban greening* 21: 239-246.

Tanhuanpää, T. 2017b. 3D-Virtuaalipuistot – kustannustehokkuutta, tarkkuutta ja lisäarvoa Helsingin viheralueiden ylläpitoon. Tutkimushankkeen loppuraportti. Verkkodokumentti. Saatavilla: https://www.hel.fi/static/kanslia/Innovaatorahasto/2017/Loppuraportti_3D_Virtuaalipuistot_Liite.pdf. [Viitattu 11.2.2018].

Tansey, K.; Selmes, N.; Anstee, A.; Tate, N.J.; Denniss, A. 2009. Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data. *Int. J. Remote Sensing* 30: 5195–5209.

Thies, M., Pfeifer, N., Winterhalder, D., & Gorte, B. G. 2004. Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6): 571-581.

Turun kaupunki. 2016. Turun kaupunkipuulinjaus. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files//turku_kaupunkipuulinjaus_tulostettavaversio_lr.pdf. [Viitattu: 23.10.2018].

Tyrväinen, L. 1997. The amenity value of the urban forest: an application of the hedonic pricing method. *Landscape and Urban planning* 37(3-4): 211-222.

Tyrväinen, L., & Miettinen, A. 2000. Property prices and urban forest amenities. *Journal of environmental economics and management* 39(2): 205-223.

Ulrich, R. S. 1984. View through a window may influence recovery from surgery. *Science* 224(4647): 420-421.

Uusitalo, J. 1995. Pre-harvest measurement of pine stands for sawing production planning. *Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja* 9. 96 s.

Van der Zande, D., Stuckens, J., Verstraeten, W. W., Mereu, S., Muys, B., & Coppin, P. 2011. 3D modeling of light interception in heterogeneous forest canopies using ground-

based LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13(5): 792-800.

Wang, Y., Lehtomäki, M., Liang, X., Pyörälä, J., Kukko, A., Jaakkola, A., ... & Hyypä, J. 2019. Is field-measured tree height as reliable as believed—A comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 147: 132-145.

Watt, P. J. & Donoghue D. N. M. 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 26(7): 1437–1446.

Vauhkonen, J., Kankare, V., Tanhuanpää, T., Holopainen, M. & Vastaranta, M. 2013. Puuston runkolukusarjan ja laatutunnusten mittaus kaukokartoituksella. *Metsätehon raportti* 223. 33 s.

Wells, N. M. 2000. At home with nature: Effects of “greenness” on children’s cognitive functioning. *Environment and behavior* 32(6): 775-795.

West, P.W., 2009. *Tree and Forest Measurement*, second ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Westphal, L. M. 2003. Social aspects of urban forestry: Urban greening and social benefits: A study of empowerment outcomes. *Journal of Arboriculture* 29 (3): 137-147.

Wilkes, P., Lau, A., Disney, M., Calders, K., Burt, A., de Tanago, J. G., ... & Herold, M. 2017. Data acquisition considerations for terrestrial laser scanning of forest plots. *Remote Sensing of Environment* 196: 140-153.

Zheng, G., Moskal, L. M., & Kim, S. H. 2013. Retrieval of effective leaf area index in heterogeneous forests with terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51(2): 777-786.